

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA HYDROMECHANIKY A HYDRAULICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Zařízení pro sycení kapaliny vzduchem

Equipment for Air Saturation of Water

Zpracoval:

Schubert Jan

Vedoucí bakalářské práce:

prof. RNDr. Kozubková Milada, CSc.

2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Schubert**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Zařízení pro sycení kapaliny vzduchem**
Equipment for Air Saturation of Water

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie kavitace v kapalině.
2. Přehled měřidel obsahu vzduchu.
3. Zpracování návodu měření obsahu vzduchu, cejchování měřidla.
4. Popis zařízení pro vizualizaci kavitace a návrh zařízení sycení vzduchem, měření kavitační oblasti v závislosti na obsahu vzduchu v kapalině.
5. Grafické zpracování výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. OSTRAVA: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 S. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.
BOJKO, M. AJ. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. Ostrava: VŠB Ostrava 2007. 182 s. ISBN 80-86634-53-1
MILLER, D., S. *Internal Flow System*. BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5.
KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM).
KOZUBKOVÁ, M. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Monografie. 130. 1.vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. 130 stran. ISBN 978-80-248-2043-9.
BÍLÝ, D. *Matematické modelování vzniku a vývoje vodní kavitace v jednoduchém prvku*. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, 2010. 120 stran.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta: Na Svobodě 3105/34
72300, Ostrava

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SCHUBERT, J. *Zařízení na sycení kapaliny vzduchem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2011, 58s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Bakalářská práce se zabývá změnou velikosti kavitační oblasti při sycení kapaliny vzduchem. V úvodu je popsán jev kavitace v kapalinách a jeho možné následky na zařízení. Následně jsou uvedeny způsoby měření kavitace a snižování a zvyšování obsahu vzduchu v kapalinách. V části zabývající se laboratorním měřením je zjišťována velikost kavitační oblasti v závislosti na obsahu vzduchu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SCHUBERT, J. *Equipment for Air Saturation of Water: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2011, 58s. Head of Bachelor Thesis: Kozubková, M.

Bachelor thesis is dealing with changes size of the cavitation with air saturation of water. In introduction it is described the cavitation phenomenon in water and his influence on equipment. In the next part the manners of cavitation measurements and decreasing and increasing of air saturation of water are introduced. In the laboratory measurements part the size of cavitation area in the dependence on the air saturation is found.

Obsah:

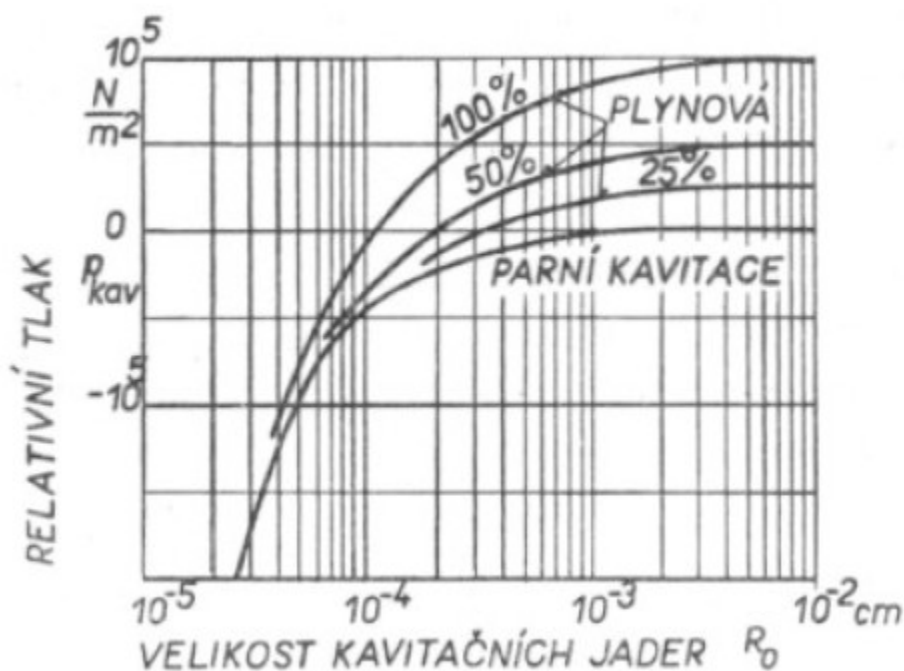
1	Úvod:	- 7 -
1.1	Co je to kavitace?	- 7 -
2	Měření kavitace	- 10 -
2.1	Účinky kavitace na materiál	- 10 -
2.2	Měření hluku a tlaku	- 11 -
2.3	Vizuální měření kavitace	- 12 -
2.4	Ultrazvukové měření kavitace	- 12 -
2.5	Vliv obsahu vzduchu na velikost kavitační oblasti	- 14 -
2.5.1	Sycení kapaliny vzduchem – zvýšení obsahu vzduchu	- 14 -
2.5.2	Snížení obsahu vzduchu	- 14 -
2.5.3	Odstranění kyslíku z vody	- 14 -
2.6	Měření obsahu vzduchu	- 15 -
2.6.1	Snímač pro měření nerozpuštěného obsahu vzduchu	- 16 -
2.7	Měřidla obsahu kyslíku	- 17 -
2.7.1	Princip měření optického čidla	- 18 -
2.7.2	Princip měření ampérového čidla	- 18 -
3	Čidlo Oxymax W COS61	- 20 -
3.1	Čidlo	- 20 -
3.2	Převodník	- 21 -
3.3	Kalibrace	- 23 -
3.4	Postup měření s čidlem	- 25 -
4	Systém pro sycení kapaliny vzduchem	- 27 -
5	Velikost kavitační oblasti v závislosti na obsahu vzduchu	- 29 -
5.1	Specifikace prvků v obvodu	- 29 -
5.2	Zařízení pro vizualizaci kavitace	- 30 -
5.2.1	Zhodnocení měření	- 32 -
5.3	Výpočty	- 38 -
6	Závěr	- 40 -
7	Seznam použitého značení	- 42 -
8	Seznam literatury:	- 44 -
9	Přílohy	- 46 -

1 Úvod:

1.1 Co je to kavitace?

Proudění kapalin v hydraulických soustavách je doprovázené kavitací a kavitačním opotřebením, hlukem a dalšími nežádoucími jevy, které se v současné době dostávají do popředí zájmu v oblastech matematického a experimentálního výzkumu problematiky kavitace v hydraulických prvcích a systémech technické praxe, neboť tyto systémy pracují za stále se zvyšujících provozních podmínek (to je tlaků a průtoků) a tudíž se tento jev objevuje v řadě technických aplikací. Popis těchto nežádoucích jevů byl dosud řešen a vyhodnocován na základě náročných experimentálních zkoušek. Lze také nalézt řadu publikací zabývajících se fyzikálními procesy v kavitaci, ultraakustice a jejich praktickým využitím v diagnostice kavitace.

Kavitace je jev, kdy v kapalině rázově vznikají a zanikají parní bubliny, zpravidla vlivem místního poklesu tlaku pod tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě a tímto se vytvoří podmínky pro nasycování kapaliny vzduchem. Tento jev výrazně snižuje životnost hydraulických zařízení. Tento účinek kavitace na materiál se nazývá kavitační napadení nebo rozrušení. V technické praxi se vyskytují dva typy kavitací, parní a vzduchová (plynová) kavitace (obr. 1).



Obr. 1 Počátek kavitace pro parní a vzduchovou kavitaci v závislosti na velikosti kavitačních jader [13]

Kapaliny obecně vykazují vlastnost rozpouštět v sobě plyny (např. minerální oleje). Vedle toho se vyskytují v kapalinách i ve formě bublin. Ke kavitaci dochází v případě, že místně poklesne statický tlak kapaliny až na tlak nasycení. Pokles tlaku vzniká zejména v místech prudkého zúžení potrubního systému např. clony, Venturiho trubice, ventily, rozvaděče a v sání hydrogenerátorů.[12]

Při kavitaci se odpařuje voda a vylučuje se jak rozpuštěný, tak i nerozpuštěný vzduch v ní obsažený a vznikají parní a vzduchové bublinky. Tyto bublinky se začnou bortit (implodovat), jakmile se tlak začne zvyšovat a způsobují tak rázové vlny. V případě oleje se hovoří o nepravé kavitaci, protože při implozi dochází vlivem stlačení k vznícení olejových par za podpory kyslíku obsaženého v rozpuštěném vzduchu v kapalině a tím i k nárůstu tepla až na 4000°C. Toto teplo však kapalina nezvládne odvést do okolí. Vzniklé saze nepříznivě ovlivňují jak kapalinu, tak i samotný hydraulický obvod zejména tím, že mění vlastnosti oleje a zanášejí filtry. Kavitate se dále může projevovat zvýšenou hlučností a vyššími vibracemi při provozu. [6, 5, 18]

Počátek plynové a parní kavitaci na sobě nezávisí, neboť obsah vzduchu má vliv pouze na vzduchovou kavitaci a ne na parní. Kavitate je nicméně působení obou těchto stavů. Parní kavitate může být způsobena i velmi malými plynovými bublinkami, které narostou do potřebných rozměrů difuzí a tím se stanou kavitačním zárodkem pro parní kavitaci. [13]

Nejčastějším místem vzniku kavitate bývá sací potrubí, ale nebezpečné jsou i náhlé změny průtočného průřezu jako clony, hrany prvků atp., může se však objevit i ve stojící kapalině, v níž se pohybuje pevné těleso (kmitá) [14]. Kavitační hluk je generován implodujícími bublinkami plynu v oblastech rostoucího tlaku a tlakovými fluktuacemi proudící tekutiny.

Informaci o možnosti vzniku kavitate a tedy hluku dává bezrozměrné kavitační číslo σ [10].

$$\sigma = \frac{p_{stat} - p_{sat}}{p_{dyn}} \quad (1)$$

kde p_{stat} je statický tlak kapaliny, p_{sat} je tlak nasycených par kapaliny při dané teplotě a p_{dyn} je dynamický tlak kapaliny.

Tlak nasycených par oleje je velice nízký a tedy $p_{sat} \approx 0$ Pa. Dlouhodobý výzkum prokázal, že hraniční hodnota vzniku kavitace je 0,5. Kavitace se tedy vyskytuje, jestliže kavitační číslo je $\sigma \leq 0,5$.

Tabulka 1 ukazuje, jak se liší doby vyloučení vzduchu pro kavitační bubliny a také dobu jejich zániku pro různá média.

Médium	Poločas pro uvolnění bublin [s]	Poločas pro rozpuštění bublin [s]
Mazací olej	11,6 až 51,4	32,7 až 414
Lehký olej	3,6 až 7,6	6,1 až 10,2
Nafta	0,3	3,1
Letecké palivo	0,64 až 1,7	1,2 až 2,6
Destilovaná voda	3,86	7,93

Tabulka 1 [13]

Následující tabulka zobrazuje hodnoty tlaku nasycených par vody při různých teplotách.

t [°C]	P _{sat} [kPa]	t [°C]	P _{sat} [kPa]
0	0,608	95,7	86,72
38,2	6,67	100	101,33
51,7	13,34	129,5	266,8
66,5	26,88	154	533,6
75,9	40,80	193	1 334
83,0	66,61	292	6 660
		333	22 092

Tabulka 2 Závislost tlaku nasycených par vody na teplotě [16]

Parní kavitace je dána vstupními podmínkami a geometrií oblasti a nelze ji ovlivnit. Tedy jedinou možností, jak ovlivnit velikost kavitační oblasti, je obsah rozpuštěného i nerozpuštěného vzduchu v kapalině. V bakalářské práci se budu zabývat tím, jak výrazně se ovlivní velikost oblasti kavitace při změně obsahu nerozpuštěného a rozpuštěného plynu (tj. směs kyslíku a dusíku) v kapalině.

2 Měření kavitace

První zkoušky odolnosti materiálu byly prováděny na oběžných kolech vodních turbín. Měly však několik nevýhod, jako dlouhou zkušební dobu a nemožnost sledovat průběh kavitačního napadení materiálu. V průběhu řady let byly zhotoveny přístroje, které buď kavitaci vyvolají, nebo na materiál působí podobnými účinky jako kavitace ve vodních strojích, ale zpravidla intenzivněji, což zkracuje dobu zkoušky.

Prvním zkušebním zařízením byla kavitační tryska, kde kapalina při průchodu nejužším místem zvýšila svou rychlost natolik, že její tlak klesl na tlak nasycených par a tím se vyvolala kavitace. Na konci kavitační oblasti se projevují účinky kavitace na materiál. V tomto místě se připevňují vzorky různých materiálů. Tyto trysky však sloužily nejen ke sledování účinků kavitace, ale i ke sledování vlastního kavitačního jevu [13].

Dnes se kavitace měří několika způsoby. Protože kavitace způsobuje v obvodu tlakové pulzace a tím zvyšuje i hlučnost celého zařízení, můžeme kavitaci zjistit tím, že budeme měřit v daném prvku hluk, tlakové pulzace nebo pokud to prvek umožňuje lze kavitaci zjistit i vizuálně. Případně můžeme zkombinovat tyto metody pro větší přesnost.

2.1 Účinky kavitace na materiál

Když se dostane kavitační bublina do oblasti vyššího tlaku, než je tlak nasycených par uvnitř kavitační bubliny, pak dochází k jejímu zániku. Malým zvýšením tlaku pára v bublině kondenzuje a vzniká dutina s velmi nízkým tlakem (téměř vakuum). Do této dutiny začne vnikat kapalina velkou rychlostí. Když se dutina zaplní, tak je kapalina zastavena velkým rázem. Pokud je bublina na povrchu materiálu, pak se vnikající kapalina zastaví právě o tento povrch, kde působí značnými silami. Tím se rozrušuje materiál. Velikost narušení závisí na velikosti rázu při zániku kavitační dutiny. Tedy rozrušení materiálu se nachází v místě zániku kavitačních bublin, tj. na konci kavitační oblasti [13]. Při zjišťování velikosti působení kavitace na materiál se měří rozdíl váhy před kavitací a po kavitaci.

Vliv kavitace je vidět na následujícím obrázku (obr. 2).



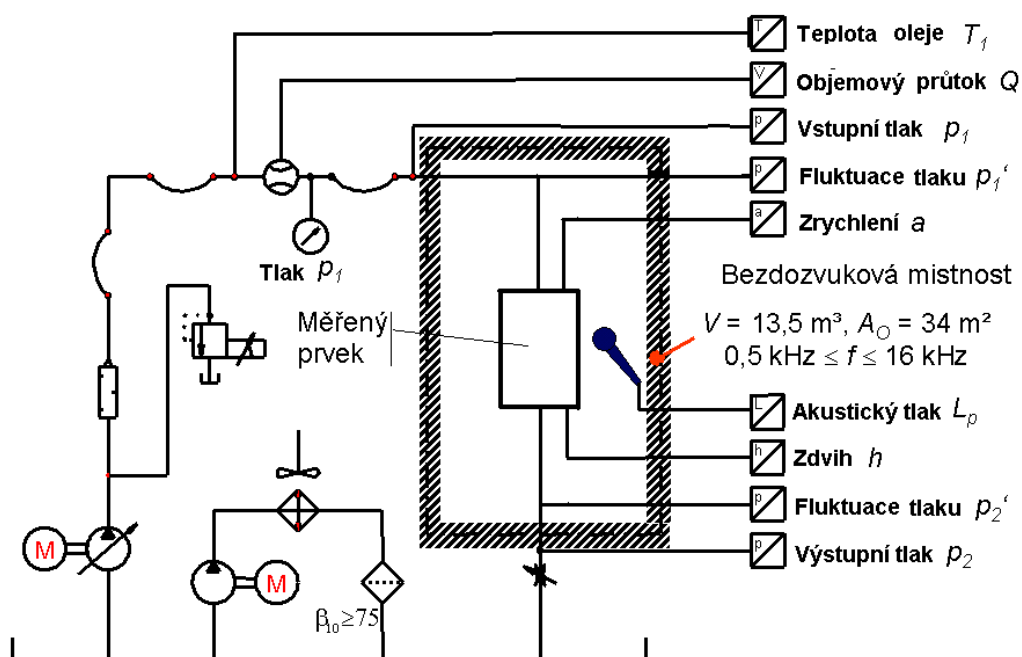
Obr. 2 Zkavitované oběžné kolo čerpadla [12]

2.2 Měření hluku a tlaku

Kavitační hluk vzniká růstem, pulzacemi a zánikem kavitačních bublin. Hlavně při zániku bubliny nabývá rychlost a tlak kapaliny velkých hodnot, které v důsledku stlačitelnosti kapaliny vyvolávají tlakové vlny. Protože v kavitační oblasti se nachází velké množství bublin, tak se jejich tlakové vlny navzájem ovlivňují. Projev všech bublin se nazývá kavitační hluk (šum). Provozní hluk (bez kavitace) je u hydraulických strojů zpravidla v oboru slyšitelných zvukových frekvencí. Kavitační hluk však připadá hlavně na ultrazvukové frekvence. Kavitační bubliny mohou mít tedy frekvence od 10 Hz pro velké pulzující bubliny (vyvinutá kavitace), až po 3 MHz pro bubliny malé. Toho je využíváno při zjišťování kavitace ve stroji bez nutnosti vizuálního sledování [14].

Experimentální zařízení pro měření tlaku a hluku hydraulického prvku [10]

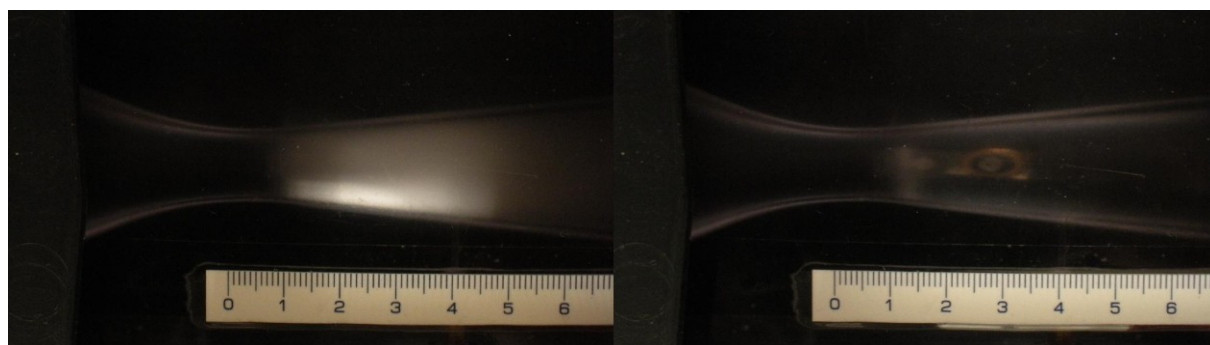
Zařízení se skládá z regulačního hydrogenerátoru a tlakového ventilu, za hydrogenerátorem by měl následovat tlumič pulsací (viz obr. 3). Hydraulický agregát musí být umístěn co nejdále od měřeného prvku a z důvodu minimalizace mechanického chvění je oddělen pryžovými hadicemi od zbytku obvodu pro snížení přenosu mechanických vibrací a tím i nepřesností v měření. Měřený prvek je umístěn v bezdozvukové komoře společně s mikrofonom. Snímače vstupního a výstupního tlaku by měly být umístěny co nejbližší měřenému prvku tak aby byl vliv tlakové ztráty vedení co nejmenší. Měření je jak statický tlak, tak fluktuace tlaku. Pokud to tvar a konstrukce prvku umožňuje, je možné v pouzdře navrtat otvory, které slouží pro zasunutí miniaturních snímačů do oblasti škrcení [10].



Obr. 3 Experimentální zařízení pro měření tlaku a hluku hydraulického prvku [10]

2.3 Vizuální měření kavitace

Kavitaci lze též zjistit pozorováním. Na katedře byl realizován obvod s Lavalovou dýzou z průhledného materiálu, kde bylo možno pozorovat kavitaci. Při určitých vstupních podmínkách vlivem náhlého poklesu tlaku pod tlak nasycených par vody při dané teplotě, se v kritické oblasti se objeví kavitace. Tento obvod bude popsán v kapitole 5. Na obr. 4 je pro ilustraci vyfotografována oblast kavitace. Oblast kavitace je však časově nestabilní a rychle se mění (pulzuje), řešením by bylo zobrazení pomocí rychlokamery.



Obr. 4 Kavitační oblast v Lavalově dýze pro plně rozvinutou kavitaci (vlevo) a pro počátek kavitování (vpravo)

2.4 Ultrazvukové měření kavitace

Zavedeme-li do kapaliny ultrazvukové vlnění, šíří se kapalným prostředím elastické vlnění. Kmitat začínají částice, vzdálené stále více od zdroje vlnění (postupné vlnění). V kapalině se šíří pouze podélné vlnění, kdy částice kmitají okolo své rovnovážné polohy ve směru vlnění.

Ke studiu kavitace a kavitačních účinků v kapalinách pomocí ultrazvuku se využívá hlavně piezokeramických soustav a měničů, které vytvářejí v kapalině ultrazvukové vlnění. Pro studium chemických účinků kavitace a elektrokorozí je nutné soustřeďovat do malých prostorů naplněných kapalinou značné intenzity ultrazvukových polí. K tomu se užívají například zařízení fokusační optiky (prozáření kapaliny).

Vlivem ultrazvukových a tlakových vln generovaných kavitací se také může exponovat fotosenzitivní emulze filmu nebo desek. Vystavíme-li tomuto působení po delší dobu (několik hodin) fotocitlivý materiál, exponuje se místo působení ultrazvukového vlnění. Expozice má obvykle tvar černé skvrny s maximem v místech největších účinků akustického pole. Tvar a velikost je závislá na čase působení vlnění na desku i na způsobu zavedení pole [15].

Magnetostrikční zdroje kmitů nízkofrekvenčního ultrazvuku umožňují dosáhnout vysokých hustot toku akustické energie bez fokusace. Navíc, při těchto nízkých frekvencích je podstatně snížena hodnota tzv. kavitačního prahu, tj. intenzity ultrazvuku potřebné k vyvolání destruktivních kavitačních jevů. Snad ještě více než u intenzivního vysokofrekvenčního ultrazvuku se v této oblasti uplatňuje i vzájemné ovlivňování jevů kavitačních a tepelných. Zvýšená teplota prostředí vytváří podmínky pro snadnější vznik a rozkmitání kavitačních bublin (např. uvolněním rozpuštěných plynů z roztoku a snížením viskozity prostředí). Na straně druhé je v prostoru s intenzivní kavitací ultrazvuk více pohlcován a to vede i k dalšímu nárůstu teploty. V souvislosti s nízkofrekvenčním ultrazvukem nelze opomenout ani tu skutečnost, že ultrazvuková kavitace může mít dvě formy. První formou je již delší dobu známý a zkoumaný radiální kmitavý pohyb volných bublin v kapalném prostředí. Druhou, kvalitativně odlišnou formou kavitace, je kmitání bublin zachycených na pevném povrchu. Z přímých pozorování metodou vysokorychlostní kinematografie (až milión snímků za sekundu) i z důkazů nepřímých (mikroskopie eroze pevných povrchů vystavených kavitaci) plyne, že bublina uchycená na pevném povrchu nekmitá kulově symetricky. V průběhu komprese se hroutí a prolamuje směrem k pevnému povrchu za vzniku mikroskopického paprsku kapaliny, dosahujícího rychlosti až $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, který působí v místě dopadu takovou silou, že mu neodolají ani titanové slitiny [17].

2.5 Vliv obsahu vzduchu na velikost kavitační oblasti

Zjištění závislosti kavitace na obsahu vzduchu je předmětem mé bakalářské práce a bude blíže popsána v následujících kapitolách.

V případě nerozpuštěného vzduchu je možno oblast kavitace ovlivnit dvěma způsoby:

1. snížení obsahu vzduchu odstátím, zahřátím
2. zvýšení obsahu vzduchu - sycením

V případě rozpuštěného vzduchu je možno oblast kavitace ovlivnit jeho snížením chemickými metodami. Zvýšit obsah rozpuštěného vzduchu za daných provozních podmínek (daný tlak a teplota) nelze.

2.5.1 Sycení kapaliny vzduchem – zvýšení obsahu vzduchu

Při sycení kapaliny vzduchem by se měla kavitační oblast zvětšit. Měření zabývající se tímto jevem bude popsáno v kapitole 3

2.5.2 Snížení obsahu vzduchu

Obsah vzduchu se dá snížit různými způsoby. Nerozpuštěný vzduch lze odstranit tak, že se kapalina nechá po napuštění nádrže odstát. Tím však se neodstraní vzduch, rozpuštěný v kapalině.

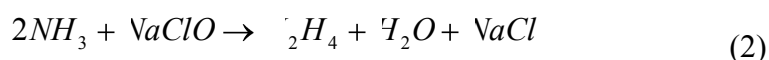
Odstranit rozpuštěný vzduch je možné jen chemicky, přesněji řečeno odstranit chemicky plynné složky. Pro jednoduchost jsem odstranil pouze kyslíkovou složku vzduchu a předpokládal snížení obsahu plynu o 21% z celkového objemu rozpuštěného vzduchu.

2.5.3 Odstranění kyslíku z vody

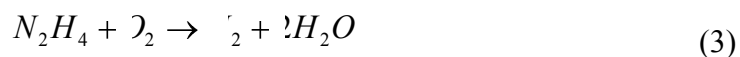
Rozpuštěný kyslík už ale je třeba odstranit chemicky. To lze udělat například pomocí chemikálií, jako je hydrazin, hydrazid, kyselina siřičitá, nebo jiné chemikálie akceptující kyslík [7].

Hydrazin

Je to anorganická sloučenina dusíku s vodíkem, bezbarvá kapalina slabého čpavého zápachu, podobného čpavku, silně zásaditá a jedovatá. Připravuje se reakcí vodného roztoku amoniaku s roztokem chlornanových solí, např. chlornanu sodného podle rovnice



Fyzikální vlastnosti hydrazinu jsou velmi podobné vodě, chemické jsou však velmi odlišné. S vodou tvoří krystalický monohydrát, $N_2H_4 \cdot H_2O$ [7, 9].

Reakce s kyslíkemSiřičitan sodný

Je to rozpustná sodná sůl kyseliny siřičité. Je sloučeninou vznikající například při odsířování kouřových plynů.

Siřičitan sodný se využívá především v průmyslu papíru a buničiny. Používá se také při úpravě vody jako akceptor kyslíku (naš případ), ve fotografii k ochraně vývojky proti oxidaci a k odstranění ustalovače (thiosíranu sodného) z emulze fotografického filmu a fotopapíru, dále v textilním a také v kožedělném průmyslu. Čistí se jím trinitrotoluen pro vojenské použití [7, 8].

Reakce s kyslíkemUrčení potřebného množství siřičitanu na základě stechiometrické rovnice (2) se určí:

Koncentrace O_2 v den 1. měření (C_{O_2}): $5,94 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Parametry nádrže: průměr (d): 1 m

Výška hladiny (h): 0,54 m

Objem vody (V): $424,115 \text{ dm}^3$

Potřebné množství siřičitanu sodného se vypočte podle vztahu:

$$m_{Na_2SO_3} = \frac{n_{O_2} \cdot 2M_{Na_2SO_3}}{M_{O_2}} \quad (5)$$

Kde $M_{Na_2SO_3}$ je molární hmotnost siřičitanu, M_{O_2} je molární hmotnost kyslíku, n_{O_2} je hmotnost kyslíku v nádrži a $m_{Na_2SO_3}$ je hmotnost dodaného siřičitanu.

Z této rovnice vychází, že potřebuji 20,05 g siřičitanu. Pro urychlení reakce jsem dávku zvýšil na 40 g, protože jsem zanedbal objem kapaliny v ostatních částech systému.

2.6 Měření obsahu vzduchu

Nerozpuštěný vzduch

Obvykle považujeme kapalinu za vícefázovou homogenní směs kapaliny a vzduchu o malém objemovém množství. Pro tento případ vícefázový model počítá s prouděním kapaliny a vzduchu, přičemž vzduchový podíl je u oleje do 12 % objemu kapaliny, u vody je to méně.

Hustotu vypočteme na základě směsi pro vícefázový model. Při vysokých tlacích je v kapalině jen nepatrný objemový obsah. [5, 12]

Rozpuštěný vzduch

K měření obsahu rozpuštěného vzduchu v kapalině bylo vyvinuto zařízení (viz kap 2.6.1), které se však hodí spíše pro olej, neboť jeho přesnost měření je $\pm 5 \%$. To je ale více než rozpustnost vzduchu ve vodě (maximálně 1,84%), kdežto u oleje je obsah rozpuštěného vzduchu asi 11 %. [12]

Rozpouštění vzduchu v kapalině je popsáno Henryho zákonem. [5, 12, 13]

$$V_{vr} = \gamma_k \cdot k \frac{p_2}{p_0} \quad (6)$$

kde V_{vr} objem vzduch rozpuštěného v kapalině
 V_k objem kapaliny
 p_0 atmosférický (počáteční) tlak
 p_a koncový tlak
 k absorpční součinitel pro směs (pro minerální olej – vzduch je $k \approx <0,093 \sim 0,11>$, což odpovídá cca 9 až 11 % vzduchu v oleji, pro vodu je tento součinitel jiný)

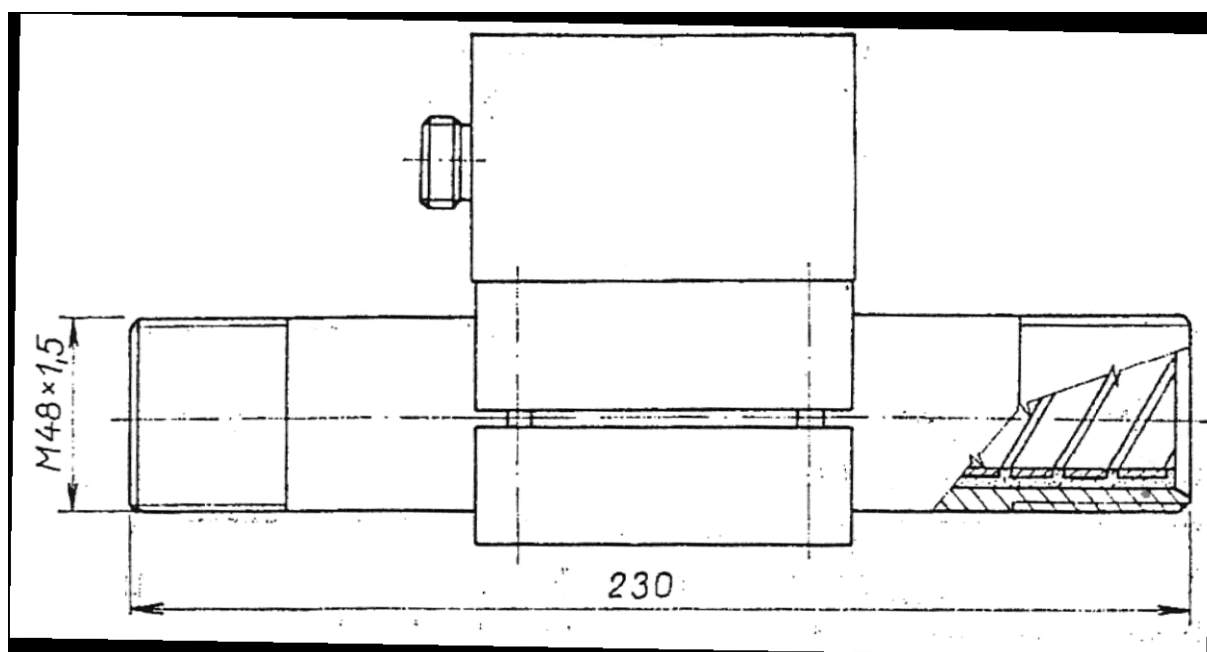
Závislost množství vzduchu v kapalině na teplotě v rozsahu teplot 20-80°C lze považovat za téměř konstantní. Podle tohoto vztahu (6) je obsah vzduchu v oleji při atmosférickém tlaku a teplotě 10°C asi 11%, bohužel pro vodu toto literatura neuvádí. S narůstajícím tlakem množství vzduchu stoupá. Jestliže dojde k narušení rovnovážného stavu nasycené kapaliny vzduchem změnou tlaku či teploty, vznikají bubliny vlivem uvolňování molekul vzduchu, čímž vzniká směs kapalina - vzduch, nebo se také může nadále vzduch v kapalině rozpouštět, to bude záviset na změně tlaků a teplot v systému. Tento děj je samozřejmě závislý i na čase. [5, 12, 13]

2.6.1 Snímač pro měření nerozpuštěného obsahu vzduchu

Snímač (viz obr. 5) byl zkonstruován na VŠB – TUO pro vestavění do hydraulického systému a je založen na principu kapacitní metody. Vyrobený měřič bude zaznamenávat malé změny kapacity, které jsou dány změnou permitivity kapalinového kondenzátoru, přičemž dielektrikum tvoří směs vzduchu a kapaliny.

Na snímači mající tvar trubky jsou umístěny měděné elektrody ve tvaru dvojchodého závitu, které lze vidět v řezu (obr. 5). Systém elektrod je v trubce zalit směsí epoxidové pryskyřice s křemičitým pískem. K odstranění případných bublin v izolační hmotě se zalití uskuteční ve vakuu, čímž zaručíme i potřebné mechanické vlastnosti. Na objímce, která je přidělena k trubce, je připevněna část můstku, předzesilovač a deska konektoru. Kompenzační kondenzátory jsou zabudovány v objímce a kabelem s konektory je snímač připojen k elektronické části měřiče [5]

Bohužel tento měřič vzduchu pracuje s chybou měření 5 %, což je pro nás nevýhodné, protože množství vzduchu ve vodě je mnohem nižší (v rozmezí 1 až 2 %). Z tohoto důvodu bude toto měřidlo aplikováno na měření obsahu vzduchu v oleji. Takže za předpokladu stejného složení vzduchu jako v atmosféře (21% O₂) můžu využít měřidla kyslíku, kterých je celá řada s různými konstrukčními provedeními.



Obr. 5 Měřič obsahu vzduchu [5]

2.7 Měřidla obsahu kyslíku

K měření kyslíku je na trhu mnoho přístrojů různých konstrukcí a použití. Co se týče konstrukčních provedení měřidel kyslíku, existují 2 typy a to s optickým nebo ampérovým principem. Ty budou popsány v následujících kapitolách. Měřidla kyslíku najdou uplatnění hlavně v čistírnách a úpravnách vod (sledování obsahu kyslíku v aktivačních reaktorech na čistírnách odpadních vod a optimalizace aeračních procesů při úpravě vody), chovu vodních

živočichů (sledování obsahu kyslíku ve vodě na chovných farmách ryb a vodních živočichů) a v životním prostředí (sledování biologického stavu povrchových vod).

2.7.1 Princip měření optického čidla

Měření obsahu kyslíku na tomto senzoru je založeno na principu tlumení fluorescence. Fluorescenční vrstva, která je v kontaktu s kapalinou, obsahuje molekuly citlivé na kyslík. Mezi parciálním tlakem kyslíku v médiu a parciálním tlakem ve fluorescenční vrstvě je rovnováha. Při ponoření senzoru do média, rovnováha se velmi rychle vytvoří.

Senzor vysílá záblesky zeleného světla na fluorescenční vrstvu a její molekuly vracejí záblesky červeného světla, kterých je tím víc a intenzivnější, čím méně je v médiu kyslíku.

Senzor vrací signál, který je úměrný koncentraci kyslíku v médiu. Vyhodnocuje také teplotu média a atmosférický tlak [1].

Popis čidla

Na následujícím obrázku (obr. 6) je schéma čidla, kde 1 je datový kabel pro komunikaci s převodníkem a napájení čidla, 2 je tělo čidla a 3 je kryt měřicí membrány.



Obr. 6 Popis čidla

Funkce krytu membrány

Kyslík rozpuštěný v médiu je difúzí přenesen do krytu membrány. Proudící médium není nezbytnou podmínkou pro měření, ale zlepší odezvu měřicího systému a zvýší rychlost měření, tím se v porovnání se statickým médiem zajistí směrodatnější naměřená hodnota. Kryt je průchozí pouze pro rozpuštěné plyny. Ostatní rozpuštěné látky v médiu, například ionty, membránou neproniknou. To znamená, že elektrická vodivost média na měřicí signál nemá žádný vliv [5].

2.7.2 Princip měření ampérového čidla

Pro měření obsahu vzduchu v kapalině se používají také ampérometrické snímací senzory, které jsou založeny na měření proudu mezi dvěma elektrodami potopenými v

roztoku elektrolytu. Hodně rozšířená je Clarkova sonda pro měření obsahu kyslíku, která je sestavena z pracovní a srovnávací elektrody (katoda a anoda). Měřicí převodník nám přivádí na elektrody polarizační napětí. Elektrolyt je tvořen vodným roztokem KCl nebo KBr. Polopropustná membrána uzavírá měřící sondu a izoluje gelový elektrolyt od měřeného roztoku, ale pro kyslík je propustná.

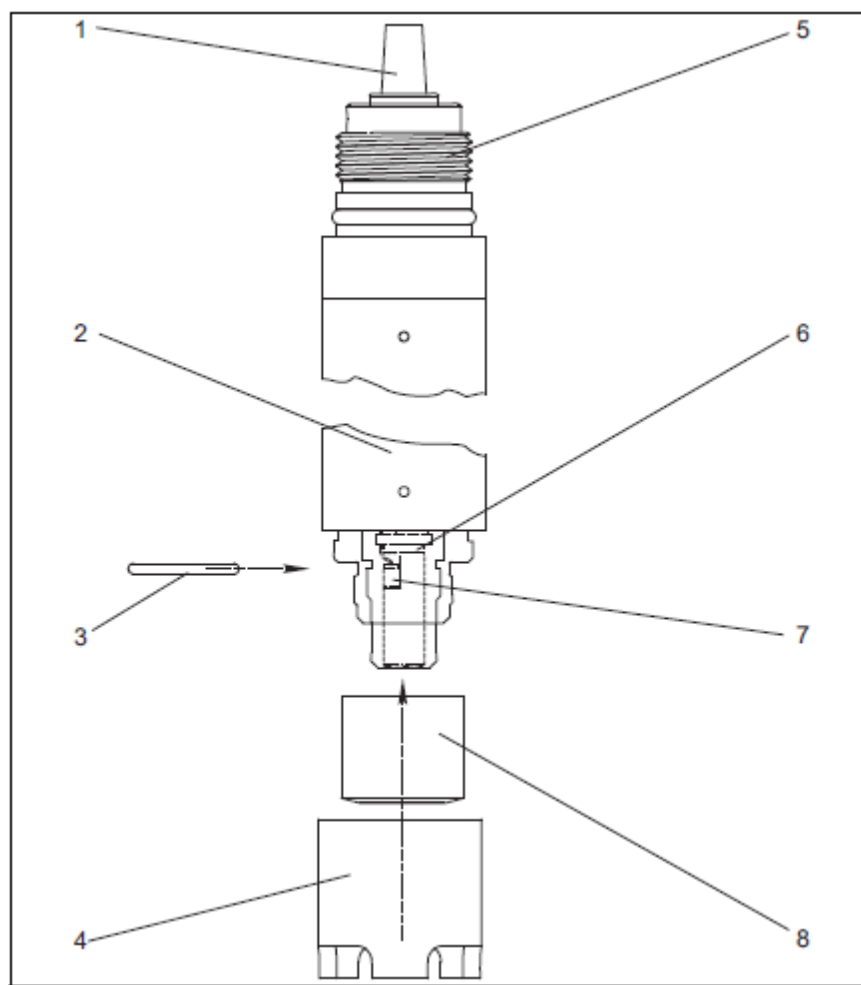
Jestliže vložíme sondu do měřeného roztoku, molekuly kyslíku obsažené v kapalině difundují membránou, vznikají oxidačně redukční reakce na elektrodách a mezi elektrodami protéká proud. Jeho velikost závisí přímo úměrně na obsahu kyslíku v kapalině. Množství obsaženého vzduchu v kapalině je značně závislé na teplotě, kterou měří sonda termistorem a výsledný signál se využije pro automatickou kompenzaci působení teploty v převodníku.

Měření je časově náročné, protože dochází k pomalému ustálení měřené hodnoty. Také je nutná častá údržba a kalibrace přístroje. Dalším prvkem je částečné spotřebování kyslíku vlivem reakcí v elektrodách a tím i zkreslení výsledných hodnot. Kapalina tedy musí při měření obsahu kyslíku proudit, jinak by se kyslík v oblasti senzoru zcela spotřeboval a měření by nemělo smysl [5].

3 Čidlo Oxymax W COS61

3.1 Čidlo

Čidlo kyslíku **Oxymax W COS61** (obr. 7) je vhodné pro nepřetržité měření obsahu rozpuštěného kyslíku ve vodě. Přístroj používá optický měřicí princip popsany v kapitole 2.7.1.



Obr. 7 Schéma senzoru [3]

- | | |
|---|---------------------------|
| 1 | Kabel senzoru |
| 2 | Sloupek senzoru |
| 3 | O-kroužek |
| 4 | Ochranný kryt |
| 5 | Závit |
| 6 | Detektor |
| 7 | Vyzařující dioda (emitor) |
| 8 | Kryt membrány |

Použití

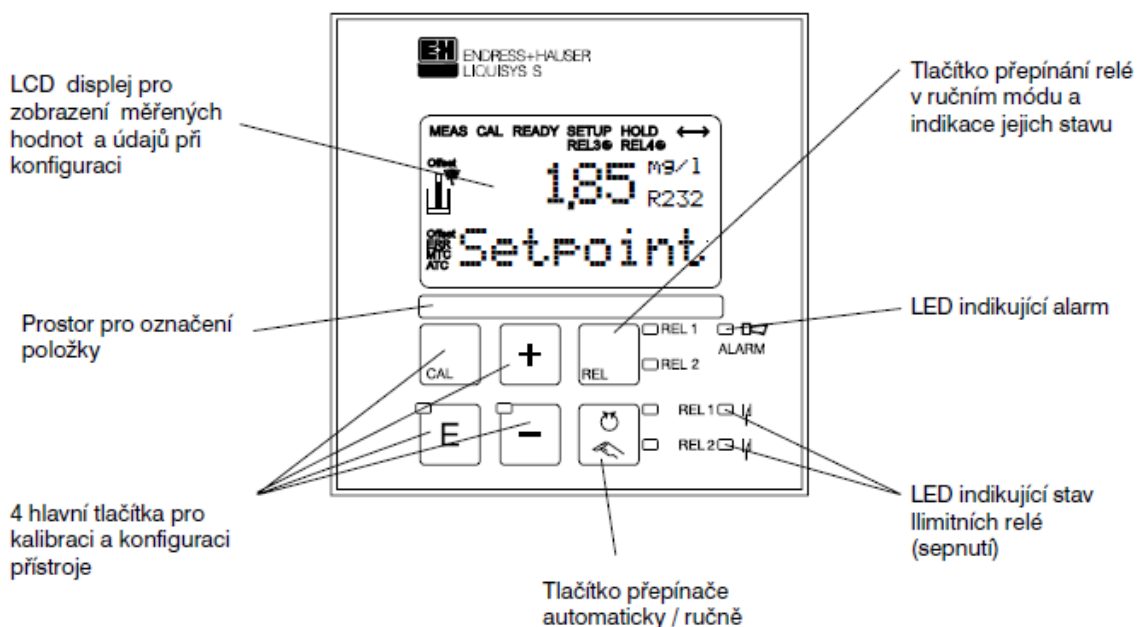
Měření, sledování a regulace obsahu kyslíku v aktivačních nádržích.

Sledování obsahu kyslíku na výpusti čistírny odpadních vod.

Sledování, měření a regulace obsahu kyslíku ve vodách otevřených vodních ploch a ve vodách určených pro chov ryb.

Sledování obohacování pitné vody kyslíkem.

3.2 Převodník



Obr. 8 Ovládací panel Převodníku [3]

Použití převodníku

Převodník COM 223/253 je určen pro měření obsahu rozpuštěného kyslíku v kapalině. Na obr. 8 je pohled na ovládací panel převodníku s displejem.

Funkce tlačítek

CAL

Po stisknutí tlačítka CAL si přístroj vyžádá přístupový kód pro kalibraci (22 pro kalibraci nebo libovolné číslo pro zobrazení kalibračních dat). Potvrzení zadání kódu opětovným stisknutím CAL. Tlačítko CAL funguje také pro pokračování funkce kalibrace.

ENTER

Vyvolání konfigurace z režimu měření.

Uložení nastavených hodnot do paměti při konfiguraci.

Odstartování kalibrace (stejná funkce jako tlačítko CAL).

PLUS, MÍNUS

Výběr skupiny funkcí

Nastavení parametrů a číselných hodnot (přidržením stisknutého tlačítka se zvyšuje rychlost nastavování)

Ovládání relé v ručním režimu

V režimu měření mají tato tlačítka ještě následující funkce

Zobrazení teploty v °F (PLUS)

Potlačení zobrazení teploty (PLUS)

Zobrazení proudu čidla v nA (PLUS)

Výběr zobrazení chyby (MINUS).

REL

Tlačítko REL přepíná v ručním režimu relé a provádí ruční start čisticí funkce. Jedná se o zapnutí automatického chemického čištění nádrže, případně potrubí, prováděné po stisku tohoto tlačítka.

AUTO

Tlačítko pro přepínání mezi automatickým a ručním ovládání relé.

funkce “návrát”

Současným stisknutím tlačítek PLUS a MINUS dojde k návratu do režimu měření (v režimu kalibrace až po ukončení kalibrace). Po opětovém stisknutí tlačítek PLUS a MINUS dojde k návratu do hlavního menu.

Uzamčení hardwaru

Při komunikaci prostřednictvím rozhraní HART nebo Profibus může být přístroj pro ovládání na místě uzamčen. Současným stisknutím tlačítek PLUS a ENTER dojde k uzamčení přístroje. Na displeji se objeví kód 9999.

Odemčení hardwaru

Současným stisknutím tlačítek CAL a MINUS dojde k odemčení přístroje. Na displeji se objeví kód 0.

Zobrazení hodnot na displeji

Zobrazení měřených hodnot na displeji může být upraveno dle individuálních požadavků.

Nastavení pomocí tlačítka PLUS

Stiskněte tlačítko PLUS pro zobrazení teploty ve °F místo °C.

Po druhém stisknutí tlačítka PLUS je potlačeno zobrazení teploty.

Po třetím stisknutí tlačítka PLUS je zobrazen proud čidla v nA .

Po čtvrtém stisknutí tlačítka PLUS dojde k návratu ke standardnímu zobrazení.

Nastavení pomocí tlačítka MINUS

Stiskněte tlačítko MINUS pro zobrazení prvního hlášení chyby.

Po druhém stisknutí tlačítka MINUS je zobrazeno další hlášení chyby až do maxima deseti hlášení.

Pokud další chyby neexistují, vrátí se displej k zobrazení měření.

3.3 Kalibrace

Čidlo je zkalibrováno ve výrobním závodě. Dodatečná kalibrace je nutná pouze ve zvláštních situacích. Při kalibraci se převodník přizpůsobuje charakteristickým hodnotám senzoru. Obvykle je kalibrace nutná jen zřídka. Nutná je v případě výměny krytu membrány. V rámci monitorování a dohlížení nad systémem může být kalibrace cyklicky sledována (ve stanovených intervalech, v závislosti na zkušenosti obsluhy) nebo obnovována [3].

Způsoby kalibrace čidla

Na vzduchu (nejlépe nasycený vodní párou, např. blízko vodní hladiny):

Toto je pro naše použití nejjednodušší způsob kalibrace, postup je následující:

Vyjmout senzor z média.

Očistit vnější část senzoru vlhkým hadříkem, pak osušit membránu senzoru.

Počkat, než se senzor přizpůsobí teplotě okolního vzduchu, to trvá zhruba 20 minut.

Zajistit, aby se senzor po tuto dobu nenacházel na přímém slunečním světle.

Ukazuje-li převodník stálou hodnotu, je třeba provést kalibraci podle návodu k obsluze převodníku.

Nyní je senzor zkalibrován a může se vložit zpět do média.

Vzduchem sycená voda

Senzor zůstává v médiu.

Při kalibraci ve vzduchem sycené vodě, ve které však není přítomen kyslík, se provede kalibrace nulového bodu.

Kalibrační intervaly

Senzor kalibrujte nejméně jednou ročně.

Při instalaci nám však technik říkal, že pro naše použití by měla platnost kalibrace vyhovovat jeden až tři roky.

Kalibrace převodníku

Kalibrace na vzduchu

V menu kalibrace se vybere možnost **Air**.

Po potvrzení se rozběhne kalibrace. Na displeji převodníku se zobrazuje odpočítávání (600 s až 0 s). Po 530 s je kontrolována po dobu 10 s strmost čidla. V průběhu posledních 60 s je kontrolována stabilita kalibrace, pokud nevyhovuje, vypíše převodník chybu **error 45** a kalibrace je přerušena.

V případě že kalibrace proběhne úspěšně objeví se na displeji **Status o.k.**

Pak už se jen přístroj zeptá, zda má výsledek uložit, nebo ne anebo jestli má proběhnout nová kalibrace.

Kalibrace ve vodě

V menu kalibrace se vybere možnost **H₂O**. Čidlo je třeba vložit do provzdušněné vody.

Po potvrzení se rozběhne kalibrace a ta probíhá jako v předchozím případě. Na displeji se zobrazuje odpočet (600 s až 0 s).

V případě že kalibrace proběhne úspěšně objeví se na displeji **Status o.k.** V opačném případě se zobrazí číslo chyby.

Pak už se jen přístroj zeptá, zda má výsledek uložit, nebo ne anebo jestli má proběhnout nová kalibrace.

Jednobodová kalibrace v médiu

V menu kalibrace se vybere možnost **Ref**. Kalibrační hodnota se stanoví externě, například jiným měřidlem kyslíku. Následně se do převodníku vloží naměřená hodnota. Nejmenší vkládaná hodnota nesmí být menší než 0,2 mg/l. Zatímco se vkládá zjištěná hodnota, tak ta musí být stabilní. Pak se obrazí strmost v procentech a status kalibrace **Status o.k.** Pokud se nezobrazí status, ale chybová hláška (**Exxx**), pak lze následně provést novou kalibraci výběrem možnosti **neu**, nebo výsledek anulovat možností **nein**. Pokud vše proběhlo správně, je navíc na výběr i možnost **ja**, kterou se výsledek uloží.

Při stisku **ja** nebo **nein** se přístroj přepne na měření, při stisku **neu** do výchozího menu kalibrace.

3.4 Postup měření s čidlem

Po zapnutí přístroje do zásuvky je prakticky ihned připraven k měření v posledním nastavení (pro nás je optimální mg/l, které jsou nyní nastaveny, teplotu a tlak si přístroj počítá automaticky), změna nastává akorát v případě, že chceme změnit nastavení zobrazovaných hodnot na displeji převodníku.

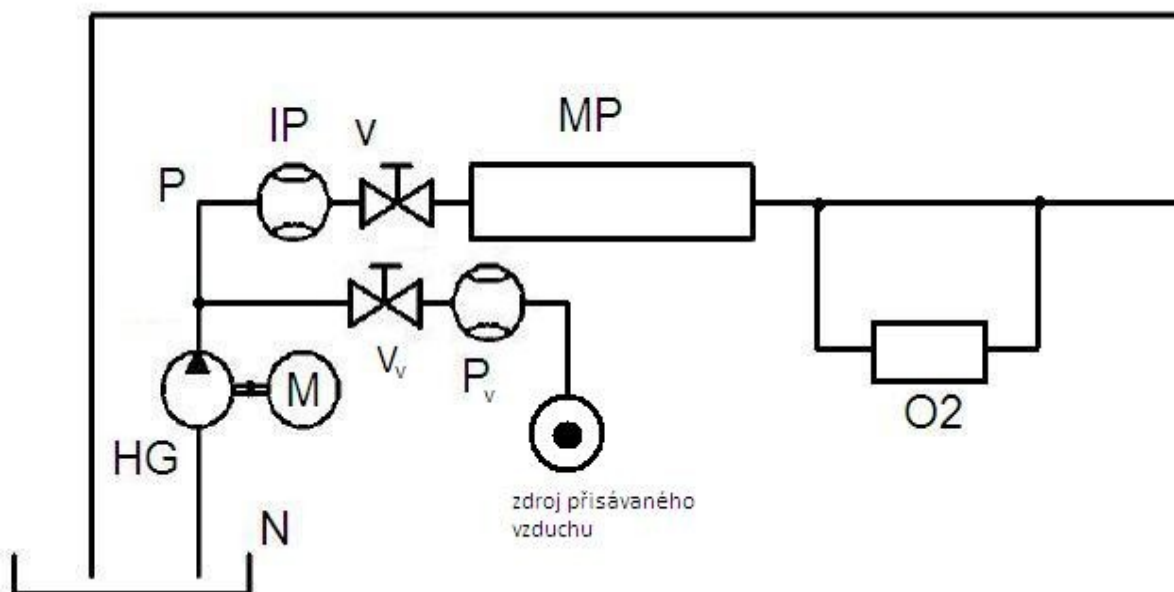
To se dělá v menu „Service“, „Setup 1“ a „Setup 2“ a postup je následující:

- Zmáčkne se tlačítko **E** a vloží se kód 22 pomocí **plus – mínus**, tím se vstoupí do menu s nastavením přístroje a následně se potvrdí **E**
- Opakovaným stiskem **mínus** se na displeji navolí **Service** a potvrdí **E**
- Jako první možnost je výběr jazyka – z uvedených možností se vždy vybere požadovaná pomocí tlačítek **plus – mínus** a následně potvrdí pomocí **E**, tento postup se opakuje vždy. Po potvrzení se vstoupí zpět do nabídek mezi jednotlivými menu (Service, Setup). Výběr nastavení v dalších menu je analogický, proto se uvede jen seznam nabídek
- Seznam nabídek v menu Setup 1 je následující:
 - Pracovní režim (mg/l – koncentrace kyslíku, %SAT – index nasycení kyslíkem, hPa – parciální tlak kyslíku)
 - Zobrazovaná jednotka (pouze u mg/l z předchozího menu, jinak se tato možnost přeskočí; mg/l, ppm, ppb)
 - Automatické korekce tlaku (zap/vyp)
 - Nadmořská výška (0 až 4000 m, pouze když je předchozí možnost vypnuta)
 - Tlumení měřených hodnot (1 až 60 – maximální, stabilizuje (zpožďuje) hodnoty na displeji a nepřesnosti)
 - Oblast měření kyslíku (větší nebo menší koncentrace)
- Seznam nabídek v menu Setup 2 je následující:
 - Salinita
 - Teplota měření (není nutné vkládat – přístroj si orientačně měří teplotu sám)

- Rozdíl mezi naměřenou a vloženou teplotou

4 Systém pro sycení kapaliny vzduchem

Při větších vzduchových bublinách v kapalině a tedy i větších kavitačních jádrech se zvětšuje kavitační tlak, což usnadňuje vznik kavitace. Při pomalých změnách tlaku v okolí bubliny může nastat její značný růst také v důsledku difúze plynu z okolní kapaliny do bubliny. K tomu dochází při přesycení kapaliny vzduchem [14].



Obr. 9 Obvod pro sycení kapaliny vzduchem (HG - hydrogenerátor, P - potrubí, IP – indukční průtokoměr, V – ventil, MP – lavalova dýza, O2 – snímač obsahu kyslíku, N – nádrž, V_v – vzduchový ventil, P_v – vzduchový průtokoměr)

Obvod pro měření kavitace [4] je rozšířen o snímač obsahu kyslíku a prvky k sycení systému vzduchem (obr. 9).

Vzduchový ventil (V_v)

Výrobce Bosh

Typ regulační vzduchový škrticí ventil



Obr. 10 Vzduchový škrticí ventil

Vzduchový průtokoměr (P_v)

Výrobce SMC

Typ PFM750-C8-E

Měřicí rozsah 1 až 50 dm³min⁻¹

Max. tlak 0,75 MPa



Obr. 11 Vzduchový průtokoměr

Zdroj tlakového vzduchu je přiváděn z centrálního rozvodu budovy laboratoří. Ostatní prvky obvodu budou popsány v kapitole 5.

Při zvýšení obsahu vzduchu se teoreticky měla kavitační oblast zvětšit. Bohužel mé měření jsem prováděl ve vodě a při sycení vody vzduchem nedocházelo k homogennímu rozptýlu bublin ve vodě, ale vzduch zůstával ve formě bublin v horní části potrubí (potrubí je průhledné) a při přechodu do Lavalovy dýzy celé zařízení značně rozvibroval, proto jsem pokus přerušil, aby nedošlo k poškození obvodu. Tento pokus se bude aplikovat pro připravované zařízení pro olejovou kavitaci.

5 Velikost kavitační oblasti v závislosti na obsahu vzduchu

5.1 Specifikace prvků v obvodu

V obvodu (obr. 20) jsem použil prvky, které už jednou sloužily pro podobný projekt vizualizace kavitace [4].

Hydrogenerátor (HG):

Výrobce:	GRUNDFOS s.r.o
Typ:	CR 20-5 A-F-A-E HQQE
Výkon:	5,5 kW
Jmenovité otáčky:	29198 min ⁻¹
Dopravní výška:	62,6 m
Průtok:	18,4 m ³ hod ⁻¹



Obr. 12 Odstředivé čerpadlo

Frekvenční měnič

Typ	YASKAWA VS mini J7
Rozsah výkonů:	síť 3x400 V – 0,2 až 4 kW
Jmenovitý proud:	9,2 A
Max. napětí:	3x380 až 400 V
Max. frekvence:	400 Hz
Přetížitelnost:	150% po dobu 1 min.



Obr. 13 Frekvenční měnič

Indukční průtokoměr

Výrobce:	ELIS PLZEŇ a.s.
Typ:	DN50 PN16 TG ISO 110
Provozní tlak:	PN 16 (1,6 MPa)
Rozsah průtoků:	0,72 AŽ 72 m ³ hod ⁻¹



Obr. 14 Indukční průtokoměr

Potrubí

Výrobce: Gumex, spol. s.r.o.

Typ: NASSA

Materiál: bílá spirála PVC

Rozměry: 60 / 68,4 mm

Pracovní tlak: -7 až 50 kPa

Pracovní teplota: -15 až 60°C



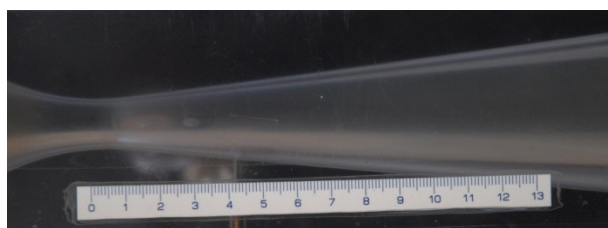
Obr. 15 Potrubí

Lavalova dýza

Výrobce: FRESCO, spol. s.r.o.

Materiál: TECANAT

Rozměry: 70x70x1000



Obr. 16 Lavalova dýza

Nádrž

Výrobce: SOVEKO PLAST s.r.o.

Materiál: polypropylen

Rozměry: ø1000x1000 mm



Obr. 17 Nádrž

Čidlo obsahu kyslíku (viz kap. 3)

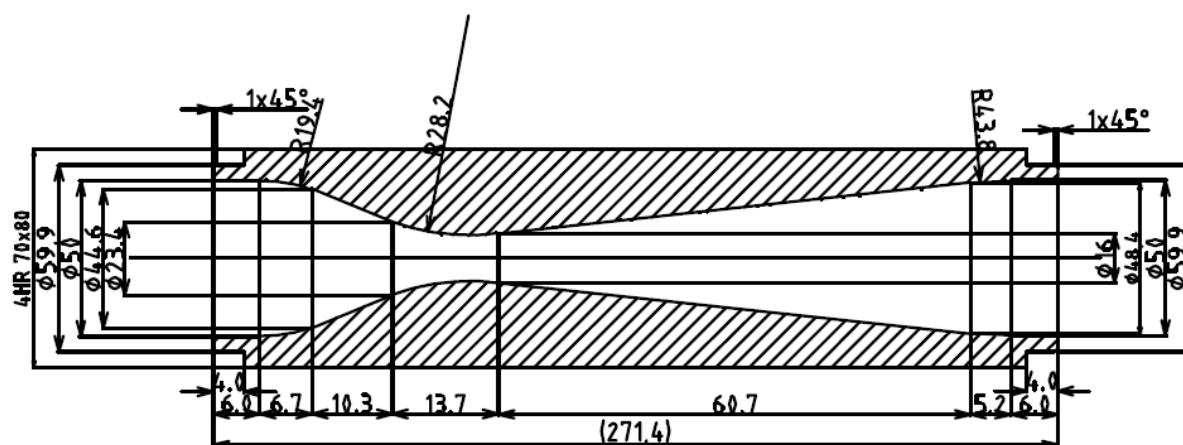
5.2 Zařízení pro vizualizaci kavitace

Pří experimentu jsem chtěl prokázat vliv obsahu vzduchu v kapalině na velikost kavitační oblasti. Kavitace probíhala v obvodu (Obr. 18 a 20) s vestavěnou Lavalovou dýzou (Obr. 18) z průhledného materiálu.

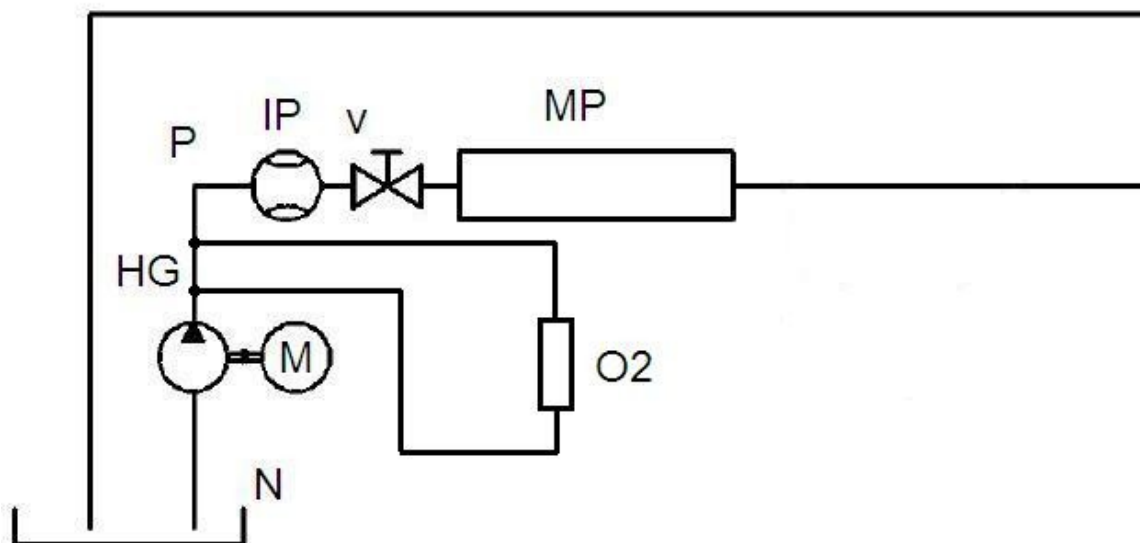


Obr. 18 Realizovaný obvod v laboratoři katedry

V obvodu jsem nastavil průtok $10,8 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$ a s postupným přidáváním siřičitanu jsem měřil klesající obsah kyslíku a zaznamenal velikost kavitační oblasti. Měření skončilo, když jsem dosáhl nulové koncentrace kyslíku, to znamená snížení obsahu vzduchu o 21%.



Obr. 19 Rozměry použité lavalovy dýzy



Obr. 20 Schéma měřicího obvodu, HG – hydrogenerátor, M - motor, N – nádrž, P – potrubí, IP – indukční průtokoměr, V – uzavírací ventil, MP – Měřicí prvek, O2 – snímač obsahu kyslíku

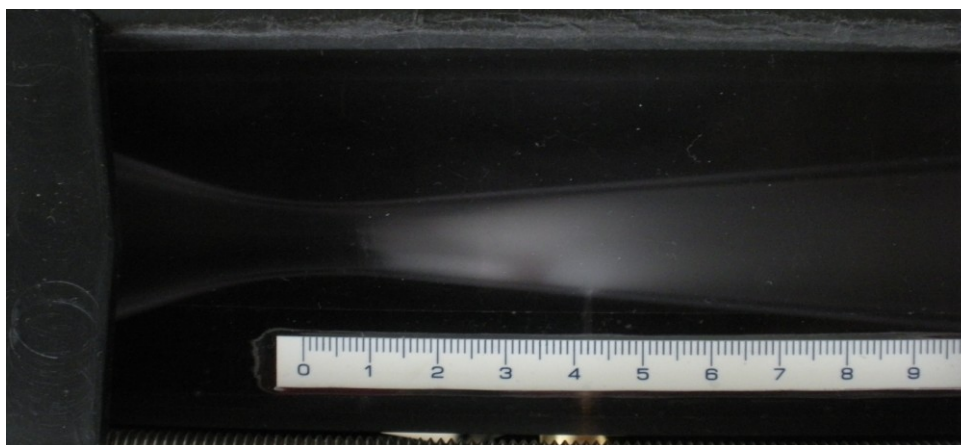
Nejrychlejší pokles kyslíku byl v prvních minutách, kdy se koncentrace snížila téměř na polovinu. Po té už reakce neprobíhala tak rychle.

Měření jsem prováděl dvakrát, protože při prvním měření jsem neměl dostatečně ostré fotografie (obr. 21 až 33) a kavitační oblast z nich nešla moc dobře vyčíst. Při druhém měření byl pozván školní fotograf, fotografie byly však také špatně čitelné, jsou uvedeny v příloze.

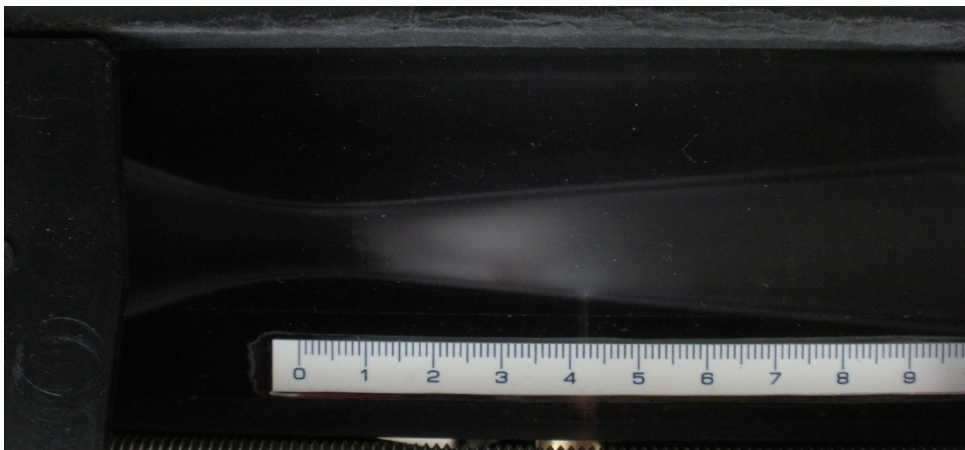
Zatímco v prvním měření se kavitační oblast viditelně měnila, v druhém měření se měnila jen minimálně, i když postup byl naprosto totožný.

5.2.1 Zhodnocení měření

Ze snímků je vidět více kavitačních oblastí, způsobených navrtanými otvory pro snímače tlaku a měření je tedy zatíženo významnou chybou.



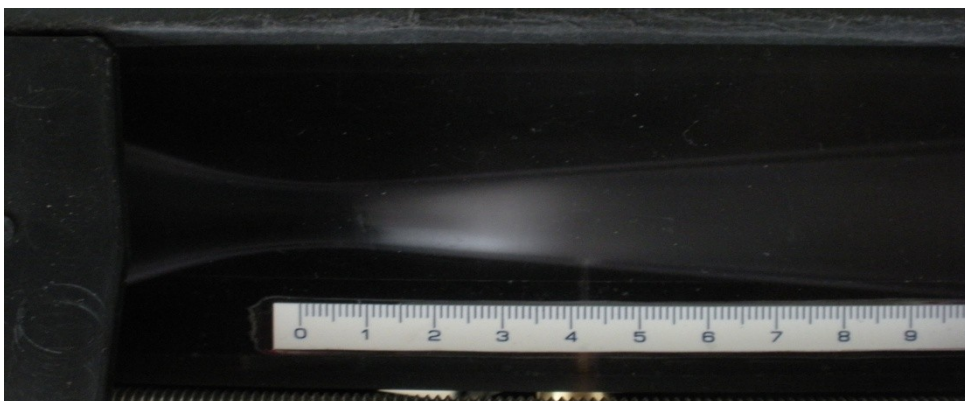
Obr. 21 Kavitační oblast pro 5,94 mg O₂



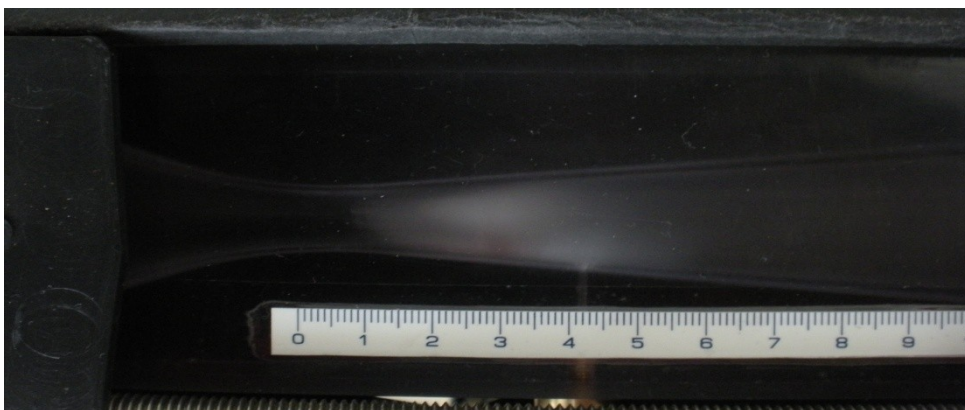
Obr. 22 Kavitační oblast pro 3,90 mg O₂



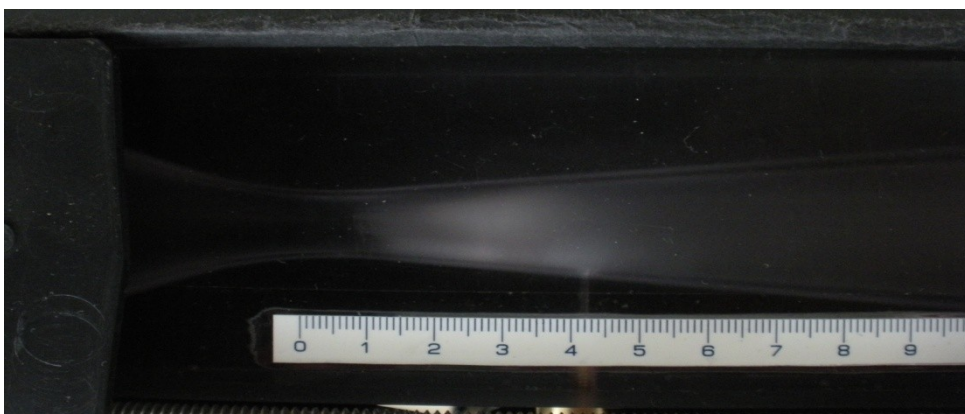
Obr. 23 Kavitační oblast pro 3,54 mg O₂



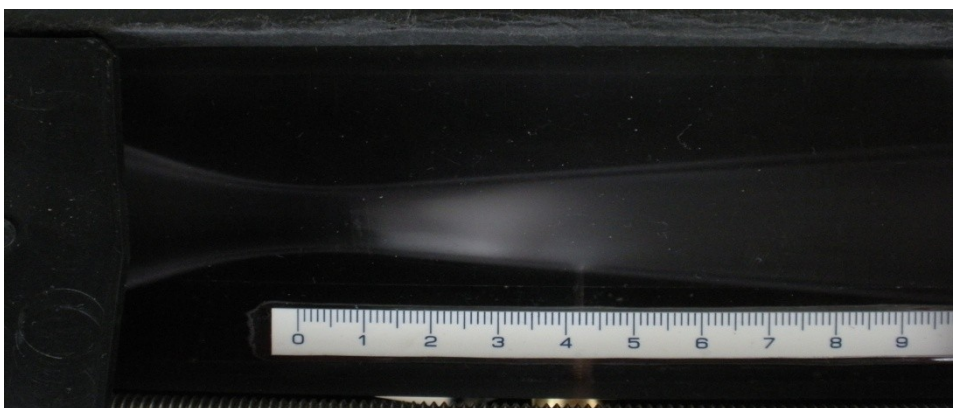
Obr. 24 Velikost kavitační oblasti pro 3,21 mg O₂



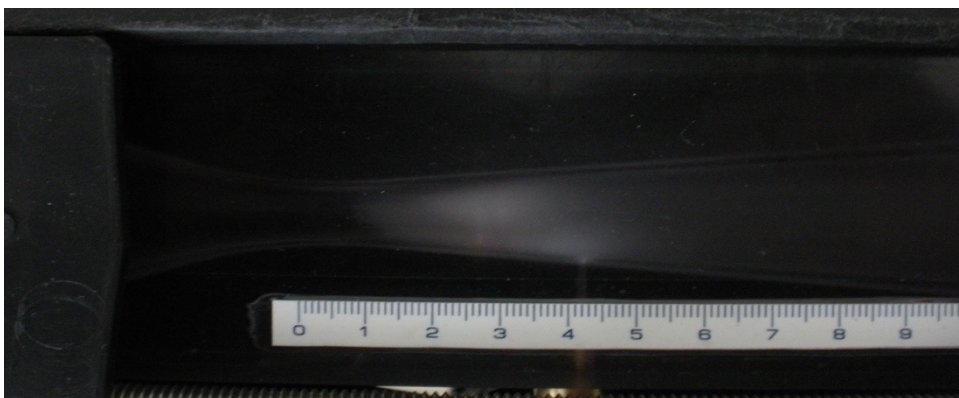
Obr. 25 Velikost kavitační oblasti pro 3,04 mg O₂



Obr. 26 Velikost kavitační oblasti pro 2,85 mg O₂



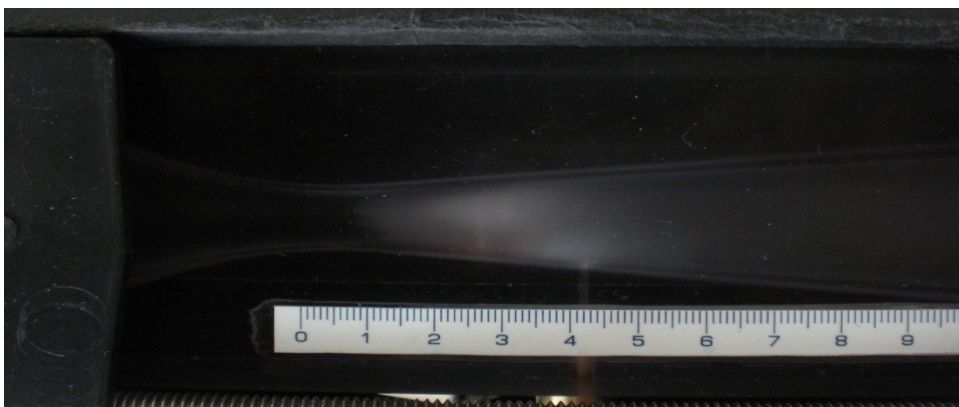
Obr. 27 Velikost kavitační oblasti pro 2,56 mg O₂



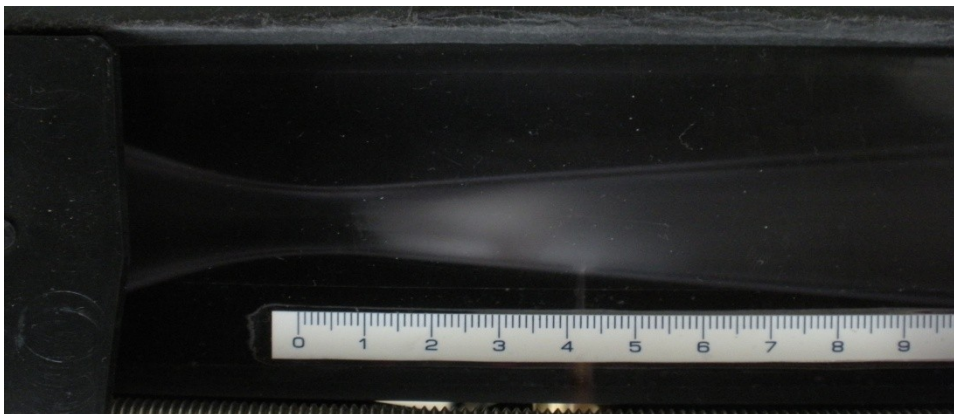
Obr. 28 Velikost kavitační oblasti pro 1,55 mg O₂



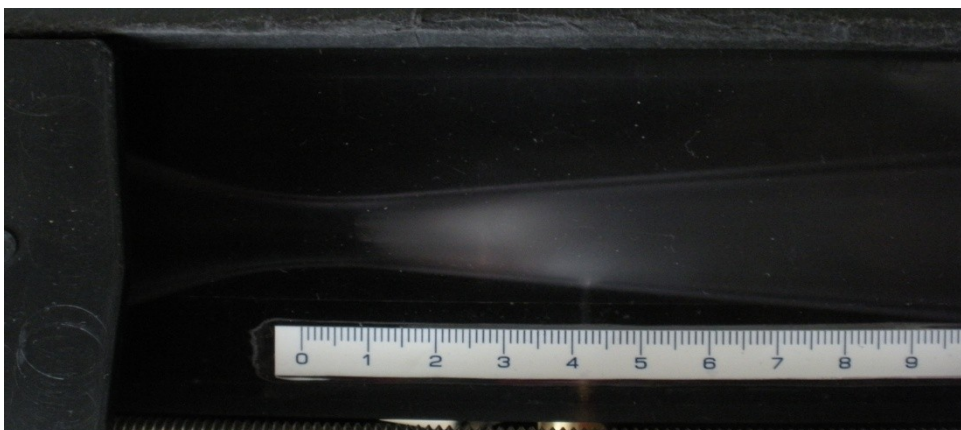
Obr. 29 Velikost kavitační oblasti pro 1,2 mg O₂



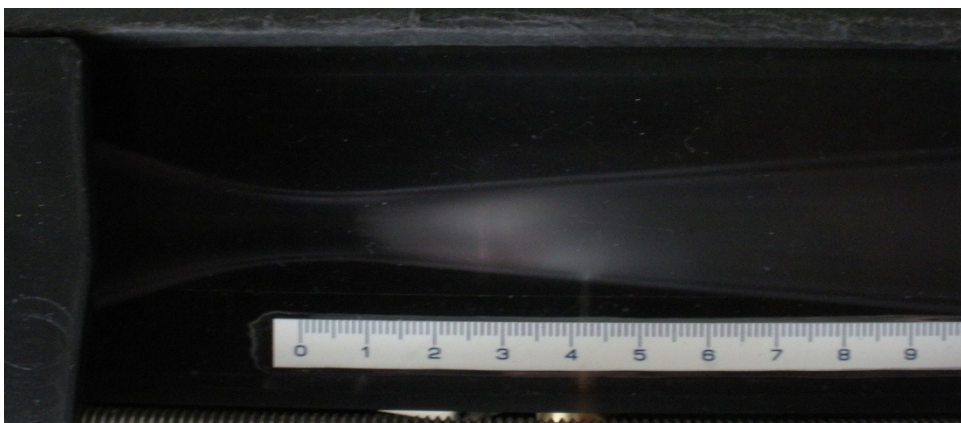
Obr. 30 Velikost kavitační oblasti pro 0,9 mg O₂



Obr. 31 Velikost kavitační oblasti pro 0,7 mg O₂



Obr. 32 Velikost kavitační oblasti pro 0,5 mg O₂



Obr. 33 Velikost kavitační oblasti pro 0,0 mg O₂

Následující tabulky (tabulka 3 a 4) zachycují velikost kavitačních oblastí vyčtených ze snímků (obr. 21 až obr. 33), které jsou však pouze pro první měření. Pro informaci o rychlosti měření jsem zaznamenal i čas při prvním měření. Rozdíly ve velikosti kavitačních oblastí jsou způsobeny pulzacemi a expoziční dobou fotoaparátu.

Obsah kyslíku α_{V1} [mg·dm ⁻³]	Velikost kavitační oblasti [mm]
5,94	57
4,77	-
3,9	53
3,54	50
3,21	47
3,04	55
2,85	52
2,56	51
1,55	49
1,2	53
0,9	50
0,7	56
0,5	51
0,0	49

Tabulka 3 data z prvního měření

Obsah kyslíku [mg·dm ⁻³]	Velikost kavitační oblasti [mm]	Obsah kyslíku [mg·dm ⁻³]	Velikost kavitační oblasti [mm]
6,06	57	3,83	53
5,97	55	3,55	52
5,85	56	3,25	53
5,73	52	2,96	53
5,64	56	2,71	53
5,57	55	2,21	52
5,49	54	1,77	54
5,42	53	1,43	53
5,3	54	1,08	52
5,08	52	0,8	53
4,95	53	0,64	51
4,8	53	0,42	55
4,69	55	0,25	52
4,33	54	0,18	53
4,17	53	0,16	55
		0	54

Tabulka 4 data z druhého měření

Graf 1 ukazuje hodnoty z tabulek 3 a 4, které jsem proložil lineární spojnici trendu (předpokládám lineární závislost). Nízká hodnota spolehlivosti R^2 je způsobena hlavně malým počtem hodnot a proto se zde silně projevují pulzace kavitační oblasti.

5.3 Výpočty

Molární plynová konstanta R	$8,314 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Teplota T	298,55 K
Tlak p na vstupu do dýzy	165000 Pa
Molární hmotnost kyslíku M_{O_2}	31,9988999 mol
Změřený obsah kyslíku C_{O_2}	$5,94 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Objemový obsah kyslíku ve vzduchu α	0,2095
Molární hmotnost dusíku M_{N_2}	28,0134 mol
Hustota kyslíku je	

$$\rho_{O_2} = \frac{p \cdot M_{O_2}}{R \cdot T} = \frac{165000 \cdot 32}{8,314 \cdot 298,55} = 2,127 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (7)$$

Objemový zlomek kyslíku ve vodě je

$$\alpha_{r_{O_2}} = 0^{-} \cdot \frac{C_{O_2}}{\rho_{O_2}} = 0^{-} \cdot \frac{5,94}{2,127} = 1,00279 \Rightarrow 279\% \quad (8)$$

Obsah zbylých složek vzduchu počítám pro zjednodušení jen jako dusík, protože jich je zanedbatelné množství, takže objemový obsah dusíku ve vzduchu bude

$$\alpha_{N_2} = 1 - \alpha = 1 - 0,2095 = 0,7905 \quad (9)$$

Koncentrace dusíku ve vodě je

$$\alpha_{p_{N_2}} = \frac{\alpha_{p_{O_2}} \cdot 0,7905}{\alpha} = \frac{1,00279 \cdot 0,7905}{0,2095} = 1,010538 \Rightarrow 1538\% \quad (10)$$

Objemový zlomek vzduchu ve vodě je

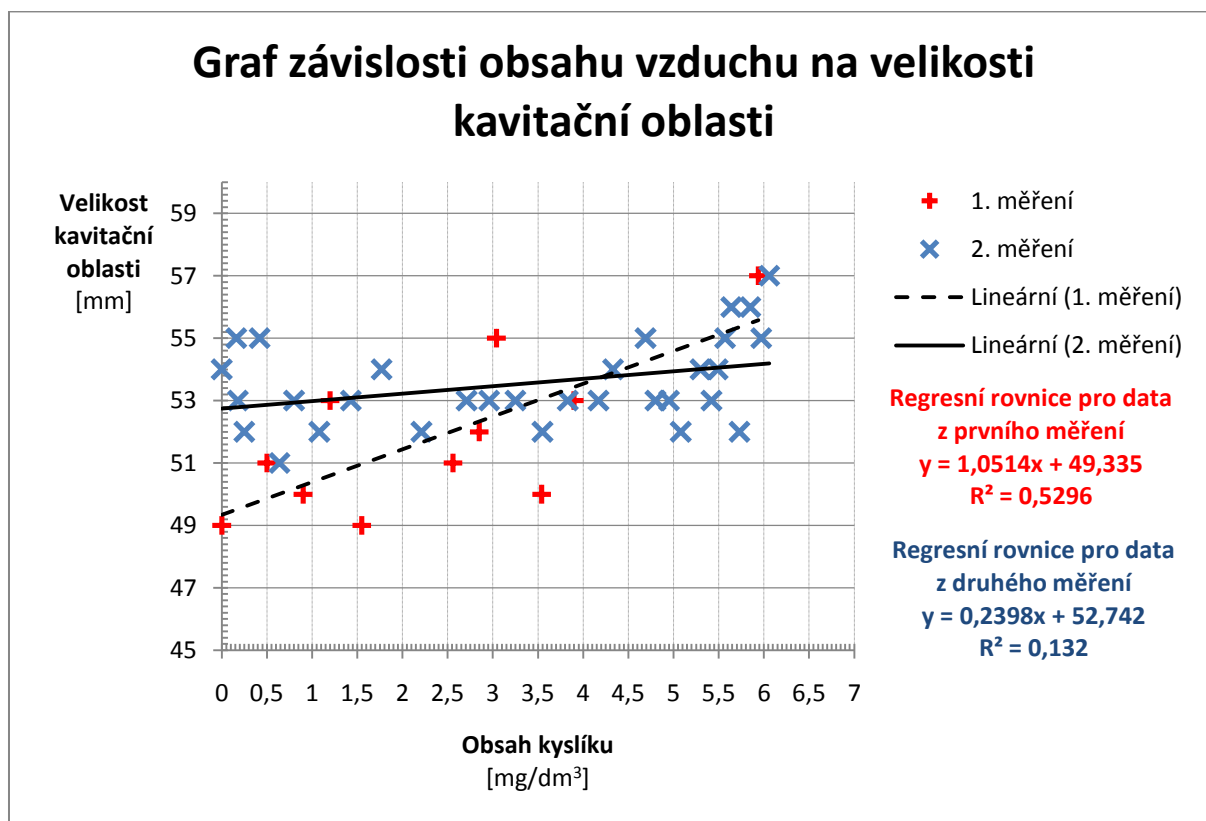
$$\alpha_{\text{vz}} = \alpha_{r_{O_2}} + \alpha_{r_{N_2}} = 1,00279 + 1,010538 = 2,01333 \Rightarrow 333\% \quad (11)$$

S využitím regresních rovnic lze spočítat, jak moc poklesl vliv kavitace v prvním měření

$$i_1 = - \frac{1,0514 \cdot \alpha_{\text{vz}} + 9,335}{1,0514 \cdot \alpha_{\text{vz}} + 9,335} = - \frac{1,0514 \cdot 0 + 9,335}{1,0514 \cdot 5,94 + 9,335} = 1,1123 \Rightarrow 11,2\% \quad (12)$$

Analogicky lze spočítat, jak výrazně poklesl vliv kavitace i v druhém měření

$$i_2 = - \frac{0,2398 \cdot \alpha_{-31} + 2,742}{0,2398 \cdot \alpha_1 + 2,742} = - \frac{0,2398 \cdot 0 + 2,742}{0,2398 \cdot 6,06 + 2,742} = 1,0268 \Rightarrow 2,7\% \quad (13)$$



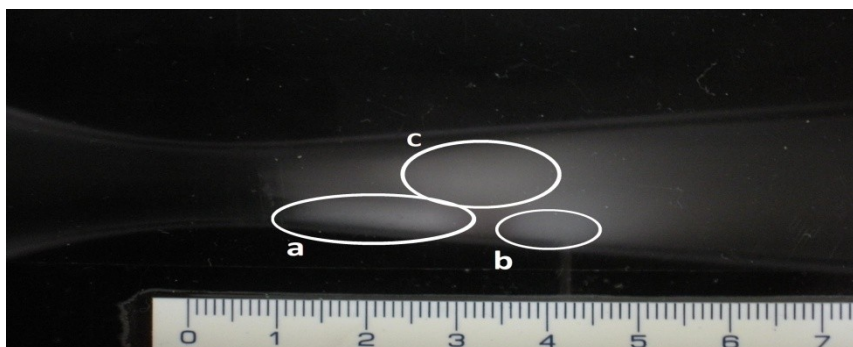
Graf 1

6 Závěr

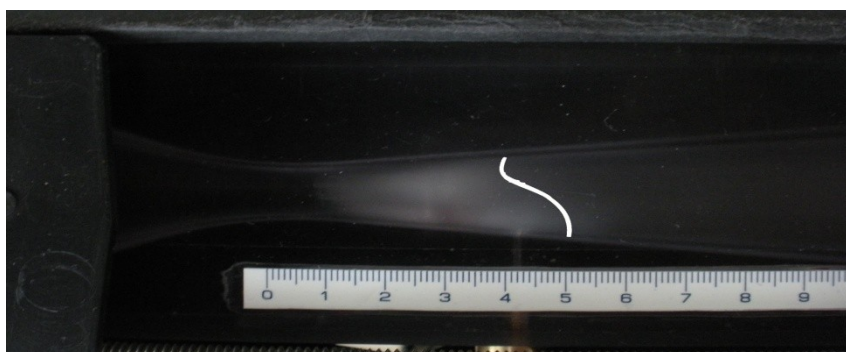
Bakalářská práce pojednává o zjištění vlivu obsahu vzduchu v kapalině na kavitaci, což je potřeba zejména z důvodu ověření matematických modelů při numerickém řešení chování kavitace. Následně se zabývá metodami zjištění obsahu vzduchu (resp. kyslíku) v kapalině pomocí různých přístrojů. Co se týče kapalin, zabývám se teoreticky i prakticky výhradně vodní kavitací.

Důležité je odstranění vzduchu z kapaliny, abych mohl porovnat měření v kapalině se vzduchem a bez vzduchu. K tomu slouží chemikálie, uvedené v kapitole 2.4.3, ze kterých jsem vybral jednu, mnou použitou při odkysličování.

Z vyhodnocení měření je patrné, že s úbytkem plynu klesá velikost kavitační oblasti přibližně lineárně. Nízká míra spolehlivosti, kterou udává koeficient korelace R^2 je způsobena malým počtem naměřených hodnot a hlavně špatnou čitelností velikosti kavitace ze snímků. Rovněž lze pozorovat více kavitačních oblastí a jejich nestejnou velikost v horní a spodní části snímků kavitace v Lavalově dýze (obr. 34). To je způsobeno vlivem vyvrtaných otvorů pro tlaková čidla, což výrazně zkresluje velikost a tvar kavitační oblasti (obr. 35).

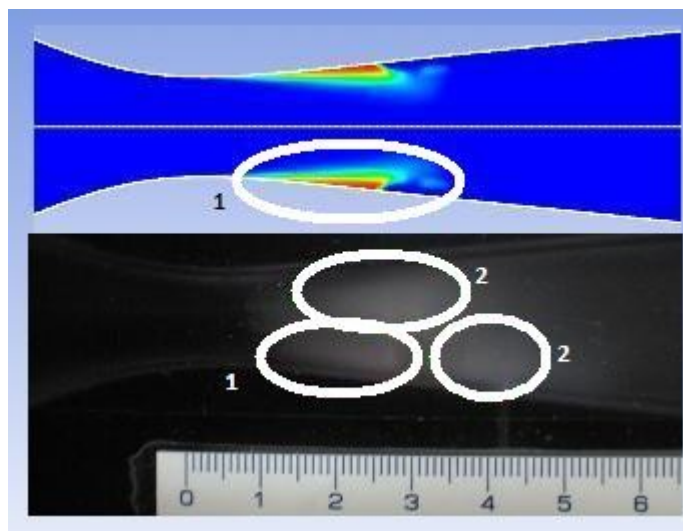


Obr. 34 Popis kavitačních oblastí, a – původní oblast kavitace, shodná s matematickým modelem; b, c – další kavitační oblasti vzniklé vyvrtáním otvorů pro tlaková čidla



Obr. 35 Křivka ukazující nestejnou velikost kavitační oblasti v horní a spodní části snímku

Pro korektní určení kavitační oblasti tedy bude zhotovena nová Lavalova dýza s hladkými stěnami, kde tyto dílčí kavitační oblasti již nebudou. Co se týče naměřených tlaků, ty jsou shodné jak velikostně tak i frekvenčně se známými matematickými modely, použitými k vymodelování této situace v programu ANSYS FLUENT [11] a jak je vidět z obr. 36, část kavitační oblasti se také chová podle modelu, bohužel také dochází k ovlivnění vlivem otvorů pro tlaková čidla.



Obr. 36 Srovnání kavitační oblasti s matematickým modelem programu ANSYS FLUENT, 1 oblast je shodná s výpočtem programu, 2 oblast je vzniklá od otvorů pro čidla [11]

7 Seznam použitého značení

α	objemový obsah kyslíku ve vzduchu	[1]
α_{r, O_2}	objemový zlomek kyslíku ve vodě	[1]
α_{r, N_2}	obsah dusíku ve vzduchu	[1]
α_{r, N_2}	koncentrace dusíku ve vodě	[1]
α_v	objemový zlomek vzduchu ve vodě	[1]
σ	kavitační číslo	[1]
ρ_{O_2}	hustota kyslíku	[kg·m ³]
d	průměr nádrže	[m]
h	výška hladiny v nádrži	[m]
i_1	pokles vlivu kavitace v prvním měření	[1]
i_2	pokles vlivu kavitace v druhém měření	[1]
k	absorpční součinitel	[1]
$m_{Na_2SO_3}$	hmotnost siřičitanu sodného	[g]
m_{O_2}	hmotnost kyslíku v nádrži	[g]
p	tlak na vstupu do dýzy	[Pa]
p_{stat}	statický tlak kapaliny	[Pa]
p_{sat}	tlak nasycených par kapaliny	[Pa]
p_{dyn}	dynamický tlak kapaliny	[Pa]
p_a	koncový tlak	[Pa]
p_0	atmosférický (počáteční) tlak	[Pa]
C_{O_2}	naměřený obsah kyslíku	[kg·m ⁻³]
$M_{Na_2SO_3}$	molová hmotnost siřičitanu sodného	[mol]
M_{O_2}	molová hmotnost kyslíku	[mol]
M_{N_2}	molová hmotnost dusíku	[mol]
R	molární plynová konstanta	[J·kg ⁻¹ ·mol ⁻¹]
T	termodynamická teplota	[K]
V_{vr}	objem vzduchu rozpuštěného v kapalině	[m ³]

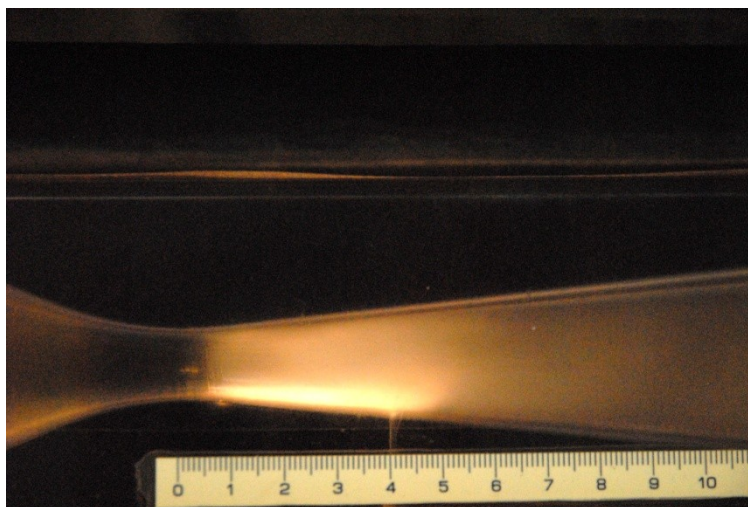
V_k	objem kapaliny	$[\text{m}^3]$
V	objem vody v nádrži	$[\text{dm}^3]$

8 Seznam literatury:

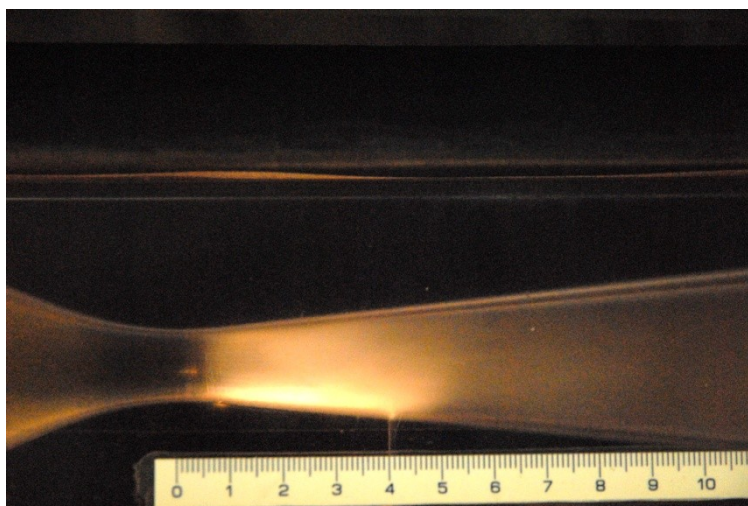
- [1] Enress+Hauser. *Oxymax W COS61*, [online]. 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <www.cz.endress.com/>
- [2] Enress+Hauser. *Oxymax W COS71* [online]. 2010 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <www.cz.endress.com/>
- [3] FIRMA Enress+Hauser. *Liquisys M COM 223/253 : uživatelský manuál*. 2010. 120 s
- [4] BABEJOVÁ, S. *Experimentální zařízení pro vizualizaci vzniku a vývoje kavitace*. Ostrava, 2010. 69 s. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava
- [5] ADAMEC, R. *Vliv obsahu vzduchu na hydraulický ráz*. Ostrava, 2010. 57 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava
- [6] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin*. Ostrava, 2010. 62 s. Syllabus předmětu. VŠB-TU Ostrava
- [7] MADEJ J., VANOVCAN J. *Chemická úprava napájacej a kotlovej vody*. Kurita Europe GmbH, Leden 2007. 11 s. Dostupné z WWW: <www.garant.cz/editor/image/produkty1_soubory/odkyslicovace-kurita-vseobecne-info.pdf>.
- [8] Siřičitan sodný. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-11]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Siřičitan_sodný>
- [9] Hydrazin. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Hydrazin>>
- [10] BLEJCHAŘ, T. *Matematické modelování nestacionárního proudění, kavitace a akustických projevů v hydraulickém ventilu*. Ostrava, 2005. 38 s. Teze doktorandské dizertační práce. VŠB-TU Ostrava
- [11] KOZUBKOVÁ, M. BOJKO M., RAUOVÁ J. *Modelování parní kavitace*, Ostrava, 2011, VŠB-TU Ostrava, osobní sdělení
- [12] KOZUBKOVÁ, M. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. 130 s. ISBN 978-80-248-2043-9.
- [13] NOSKIEVIČ, J., *Kavitace*. 1. Vyd. Praha: Academia 1969. 278 s.
- [14] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL, 1989. 336 s. ISBN 80-03-00206-0.

- [15] BRDIČKA, M.; SAMEK, L.; TARABA, O. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL, 1981. 336 s.
- [16] BOJKO, M.; KOZUBKOVÁ, M.; RAUTOVÁ, J. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. 298 s. ISBN 978-80-7385-033-3.
- [17] MORAVEC, V. Ultrazvuk jako biofyzikální činitel: Léčebné aplikace nízkofrekvenčního ultrazvuku. In *Povídání o ultrazvuku* [online], 1995 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.med.muni.cz/~vmornst/ultrazv.htm>>.
- [18] DRÁBKOVÁ, S. *Doprava kapalin* [online]. 6, 2010 [cit. 2011-04-10]. Kavitace, 10 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/Data/Dopravakapalin.zip>>.

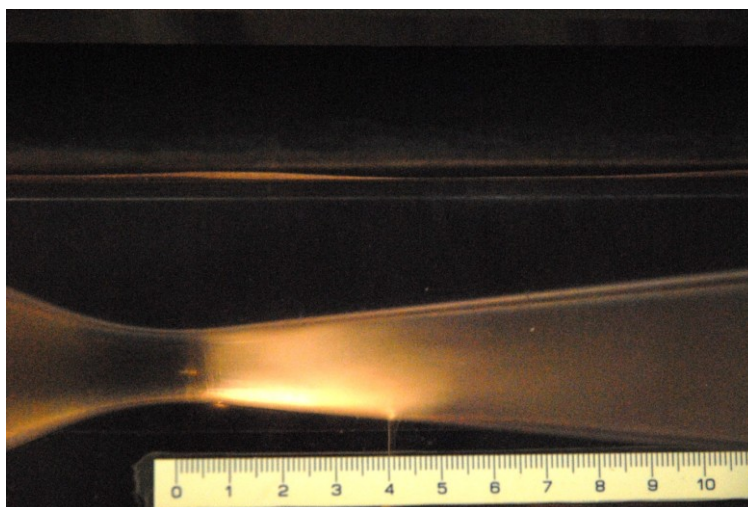
9 Přílohy



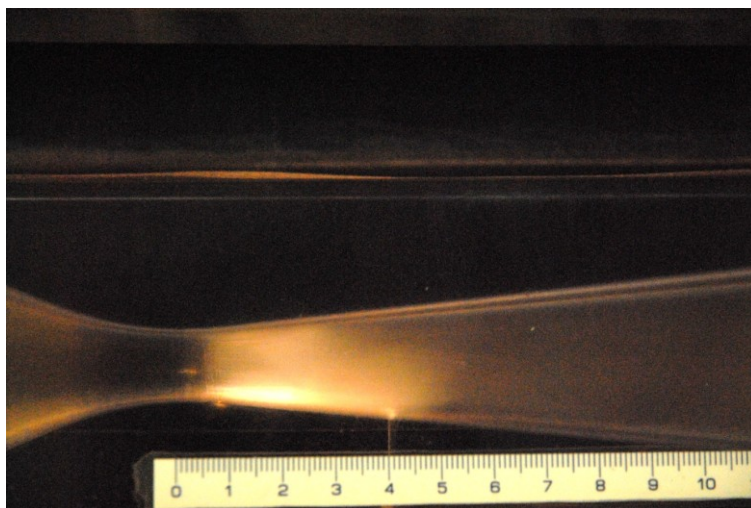
Obr. P 1 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($11,4 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



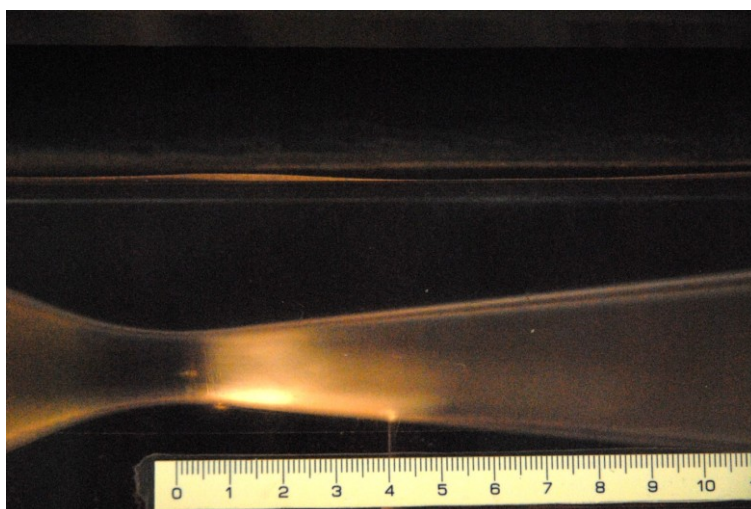
Obr. P 2 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($10,8 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



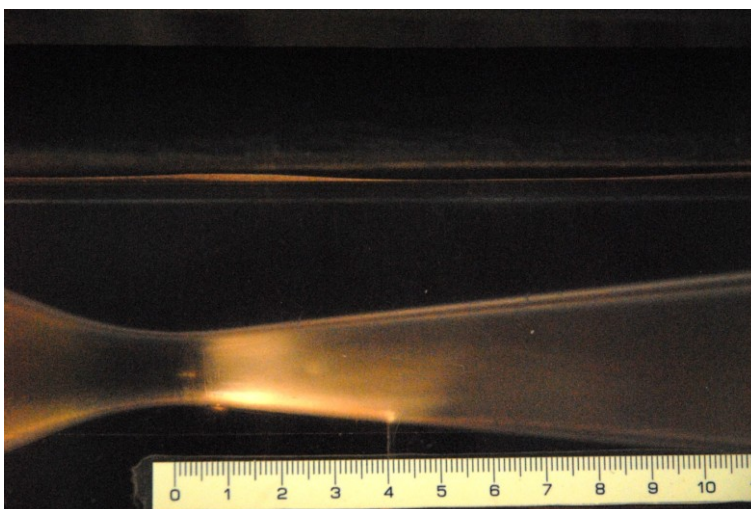
Obr. P 3 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($10,6 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



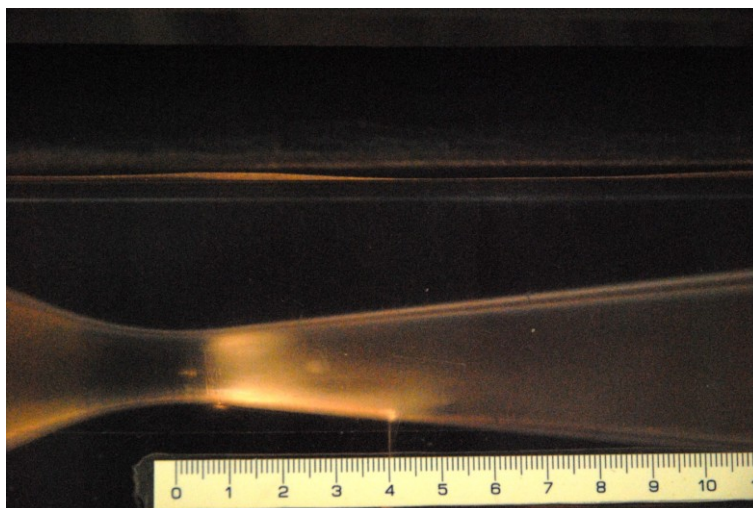
Obr. P 4 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($10,4 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$)



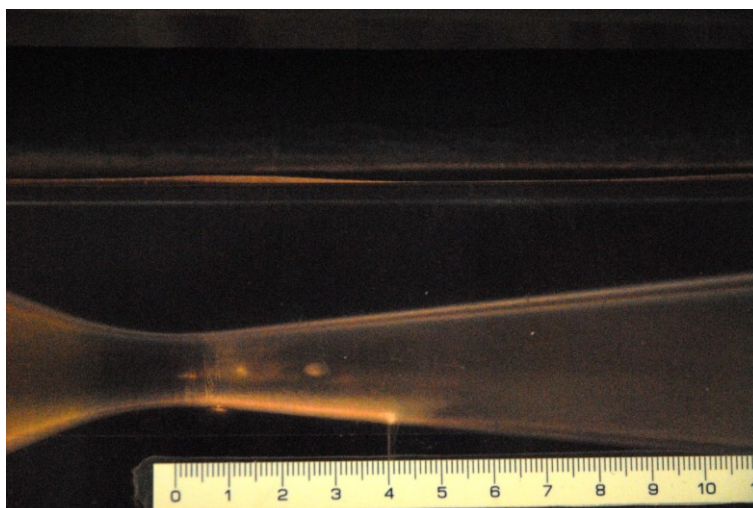
Obr. P 5 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($10,1 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$)



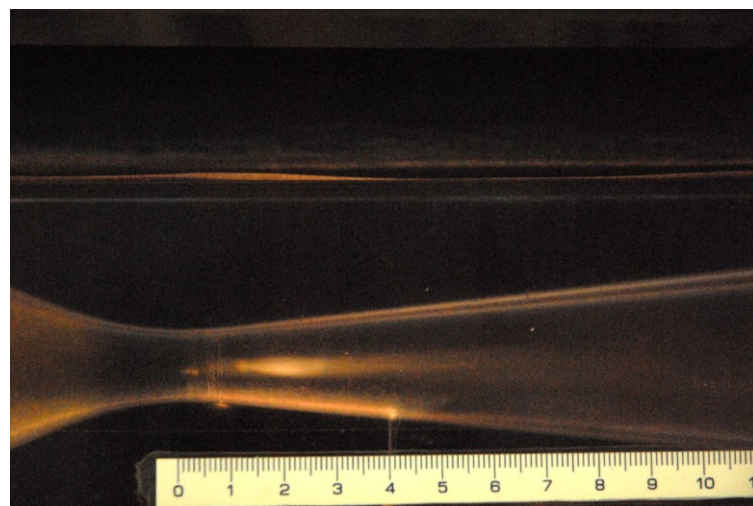
Obr. P 6 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($9,5 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$)



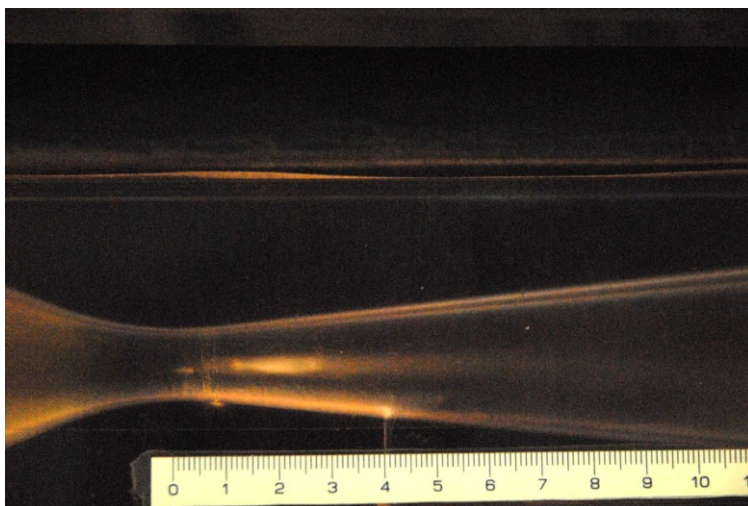
Obr. P 7 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($9,3 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



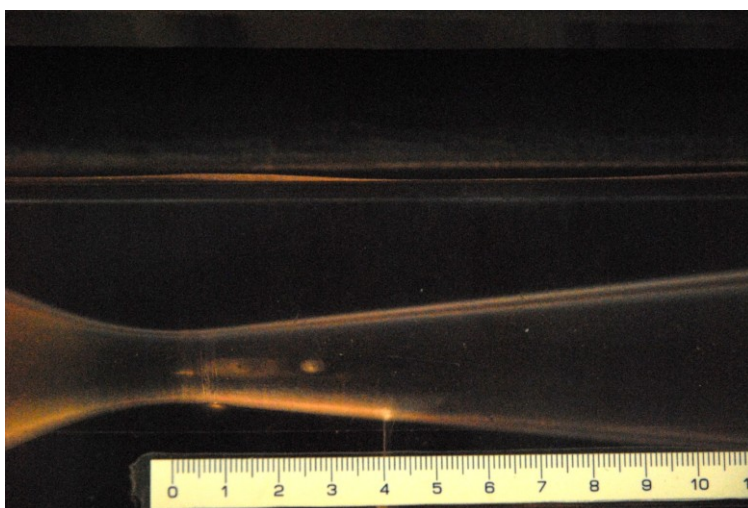
Obr. P 8 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($9,0 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



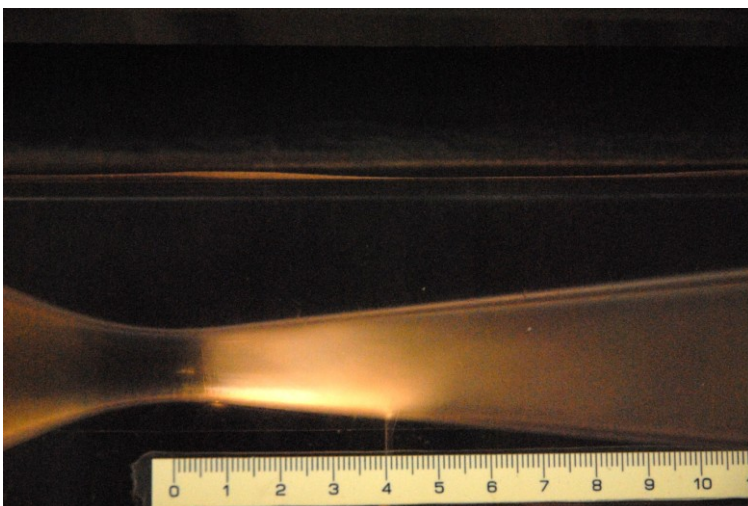
Obr. P 9 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($8,9 \text{ m}^3\text{hod}^{-1}$)



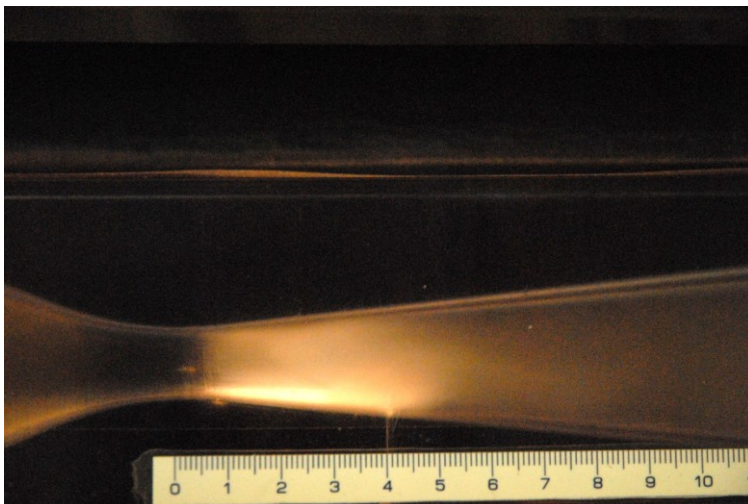
Obr. P 10 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($8,4 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$)



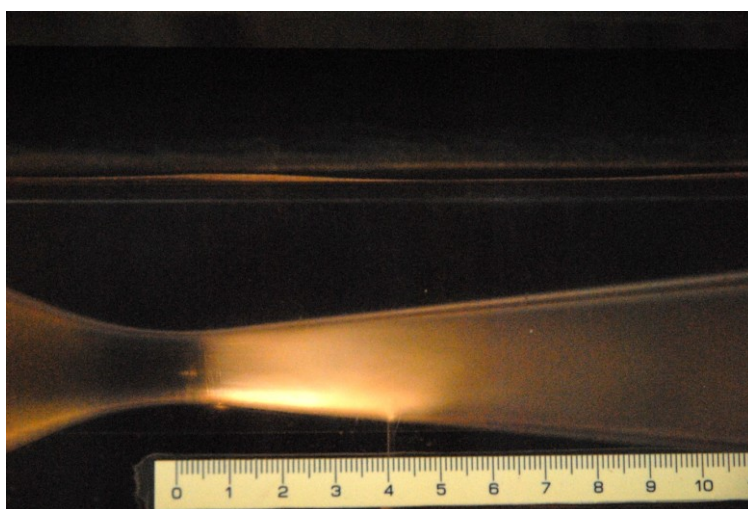
Obr. P 11 Velikost kavitační oblasti podle průtoku ($0 \text{ m}^3 \text{hod}^{-1}$)



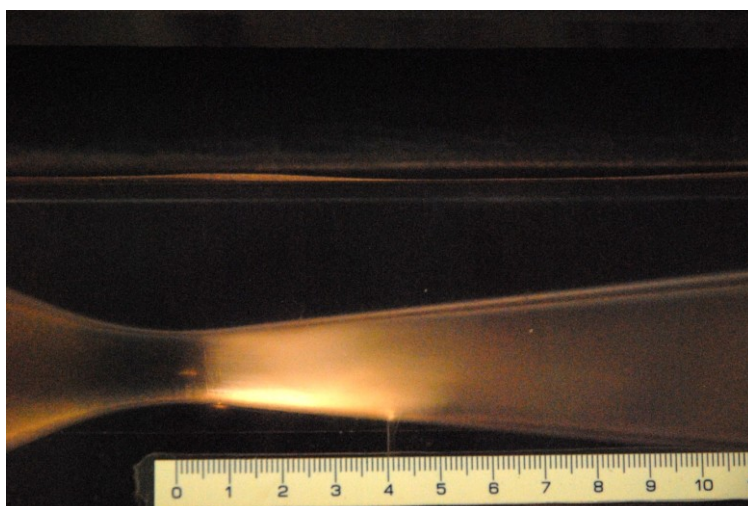
Obr. P 12 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($6,06 \text{ mg/dm}^3$)



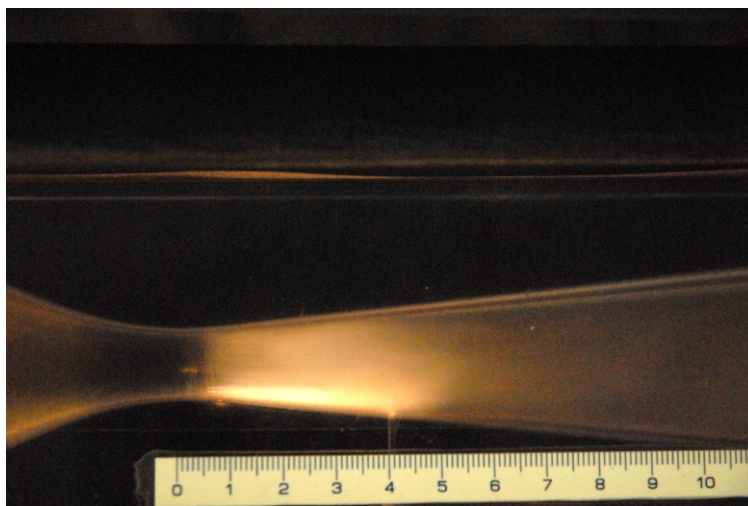
Obr. P 13 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,97 \text{ mg/dm}^3$)



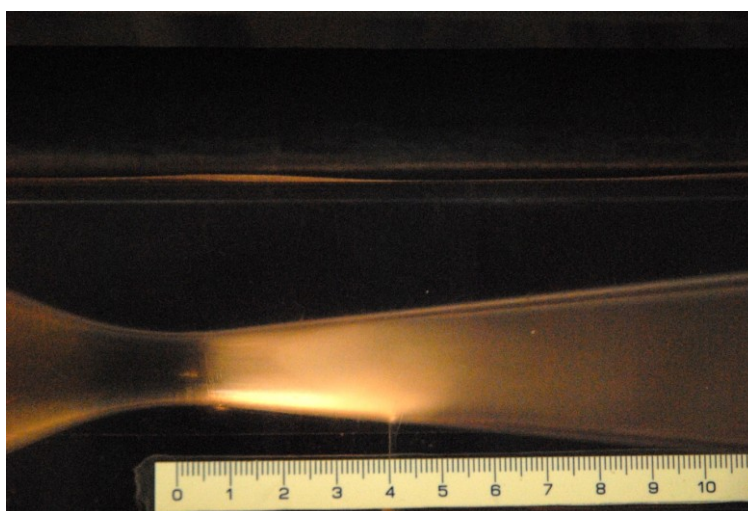
Obr. P 14 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,85 \text{ mg/dm}^3$)



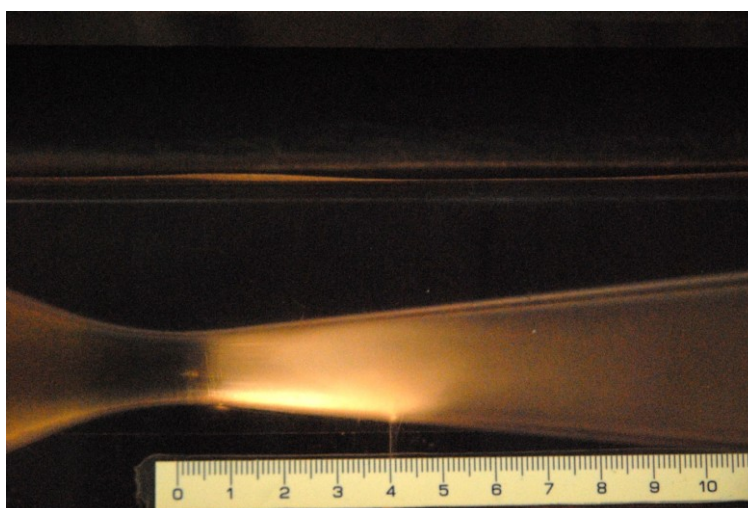
Obr. P 15 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,73 \text{ mg/dm}^3$)



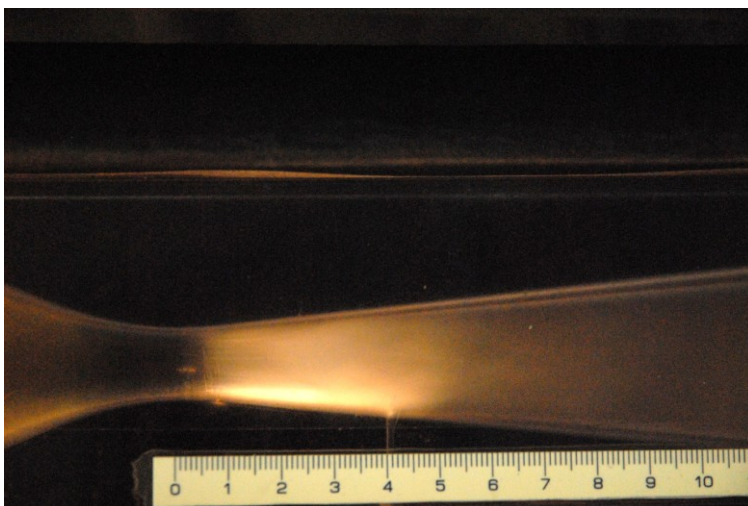
Obr. P 16 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,64 \text{ mg/dm}^3$)



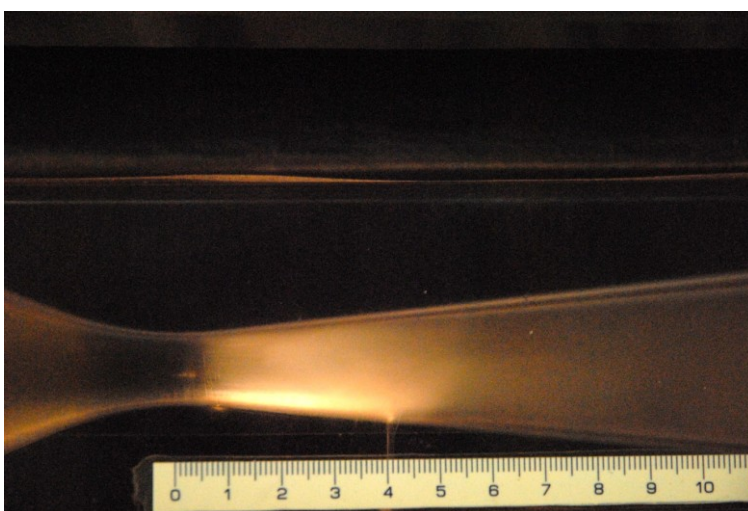
Obr. P 17 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,57 \text{ mg/dm}^3$)



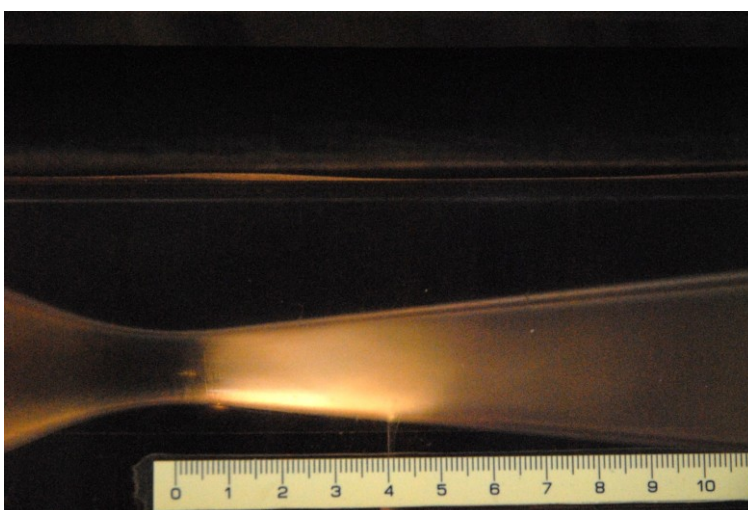
Obr. P 18 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,49 \text{ mg/dm}^3$)



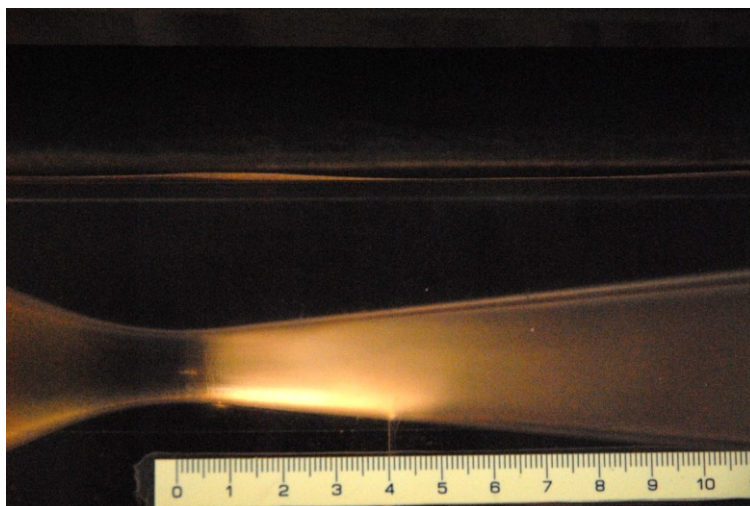
Obr. P 19 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,42 \text{ mg/dm}^3$)



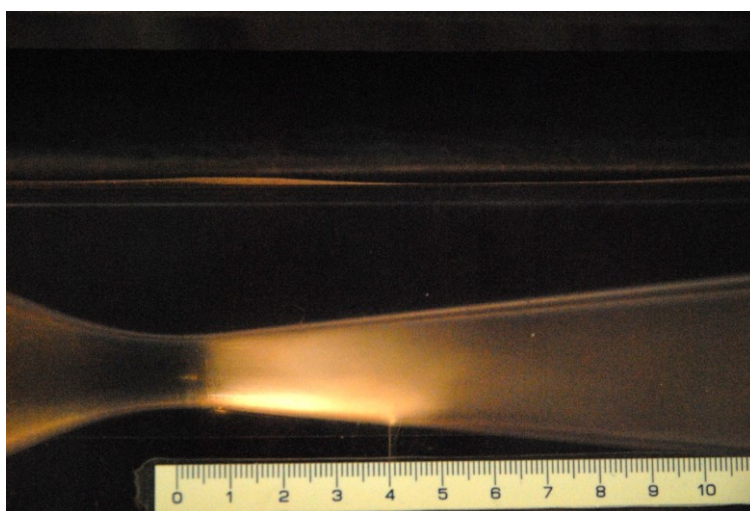
Obr. P 20 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,30 \text{ mg/dm}^3$)



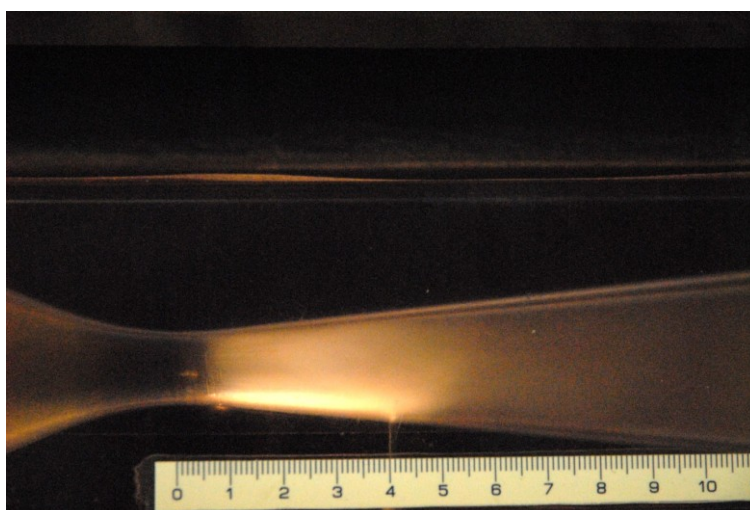
Obr. P 21 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($5,08 \text{ mg/dm}^3$)



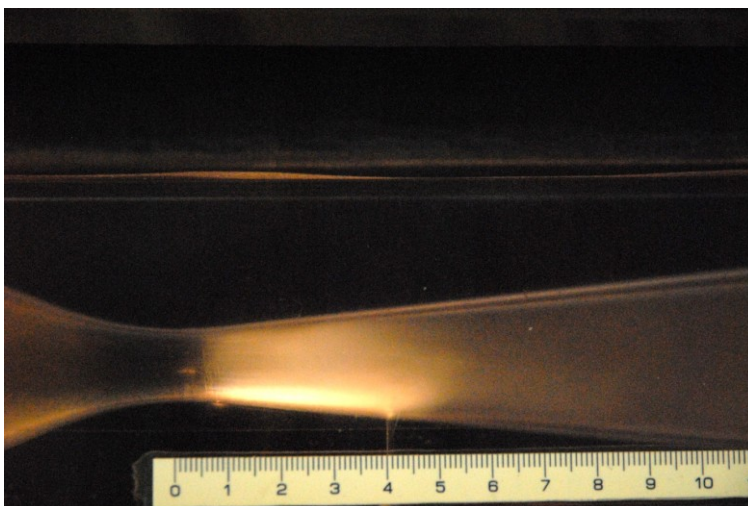
Obr. P 22 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($4,95 \text{ mg/dm}^3$)



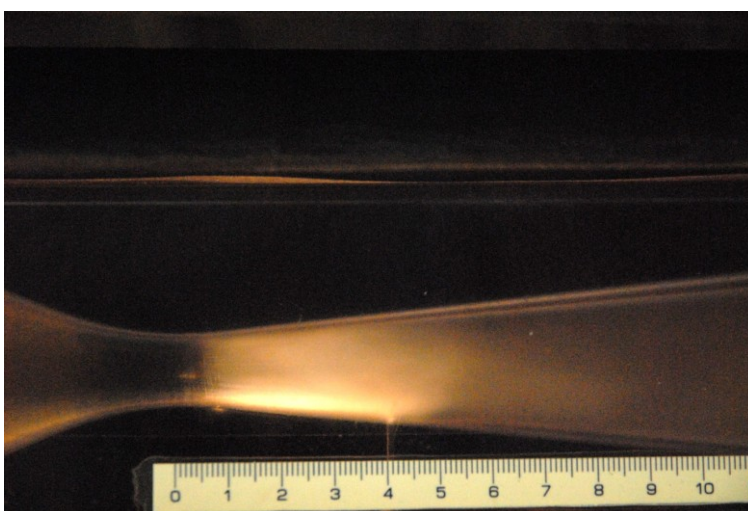
Obr. P 23 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($4,80 \text{ mg/dm}^3$)



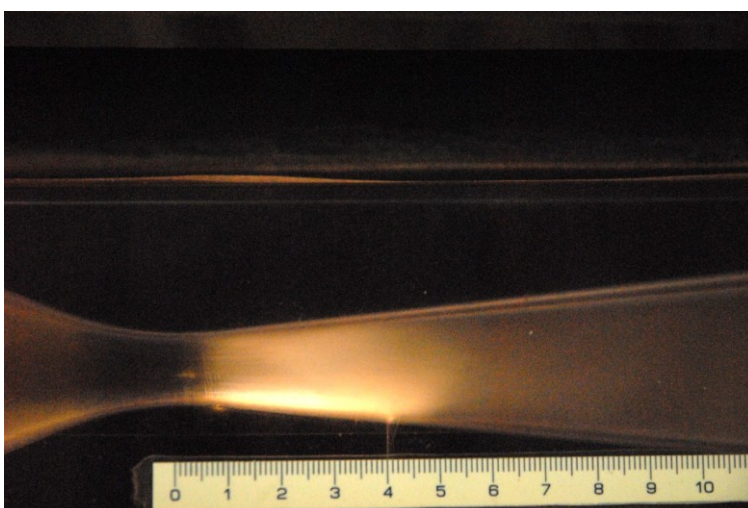
Obr. P 24 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($4,69 \text{ mg/dm}^3$)



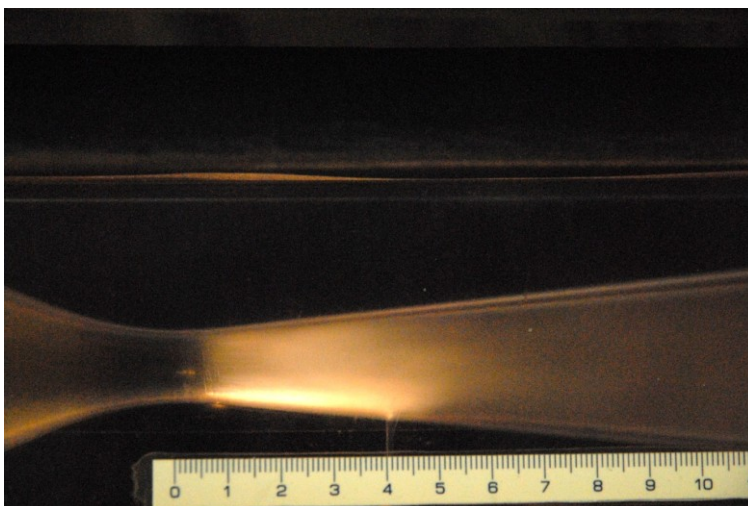
Obr. P 25 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($4,33 \text{ mg/dm}^3$)



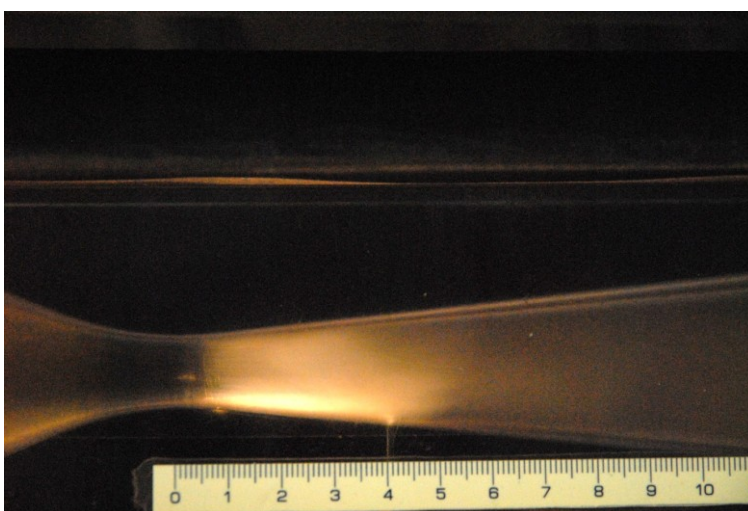
Obr. P 26 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($4,17 \text{ mg/dm}^3$)



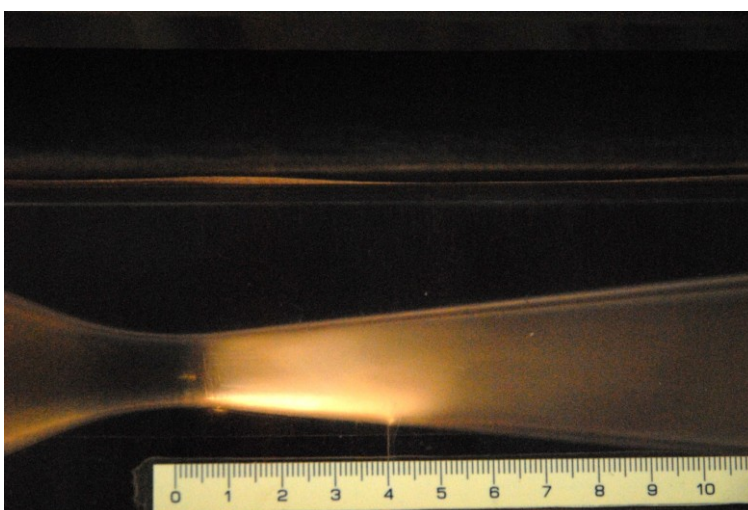
Obr. P 27 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($3,83 \text{ mg/dm}^3$)



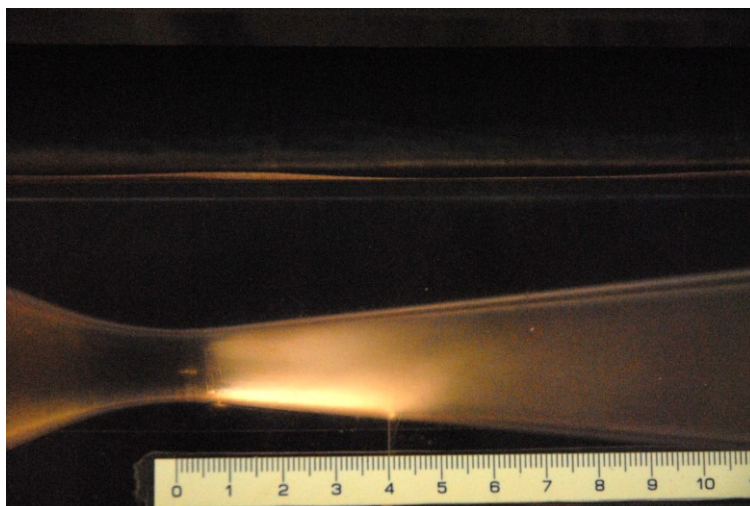
Obr. P 28 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($3,55 \text{ mg/dm}^3$)



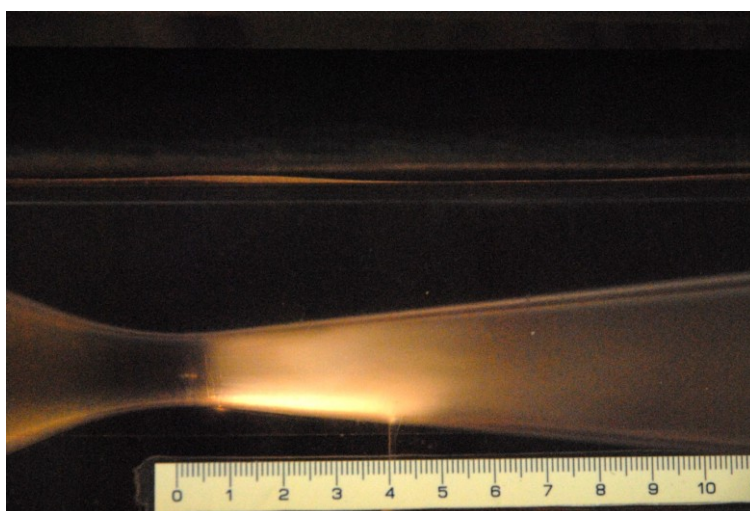
Obr. P 29 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($3,25 \text{ mg/dm}^3$)



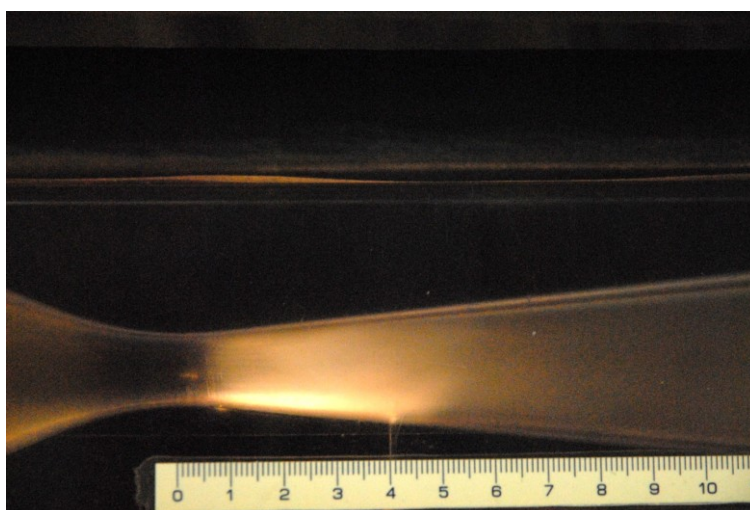
Obr. P 30 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($2,96 \text{ mg/dm}^3$)



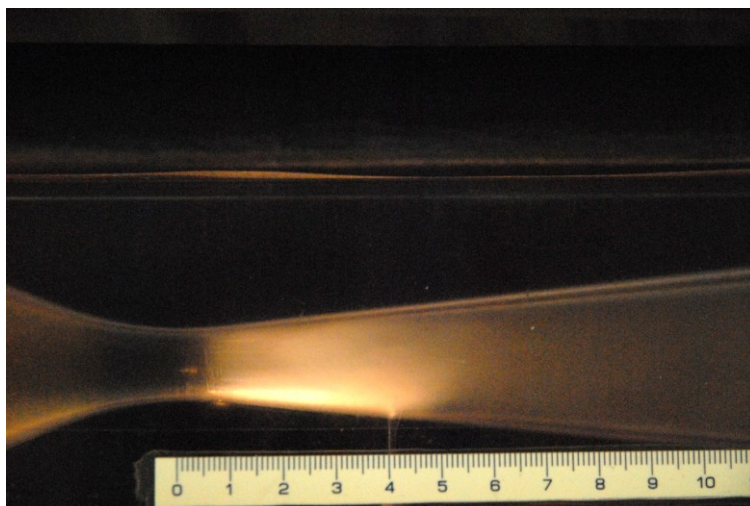
Obr. P 31 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($2,71 \text{ mg/dm}^3$)



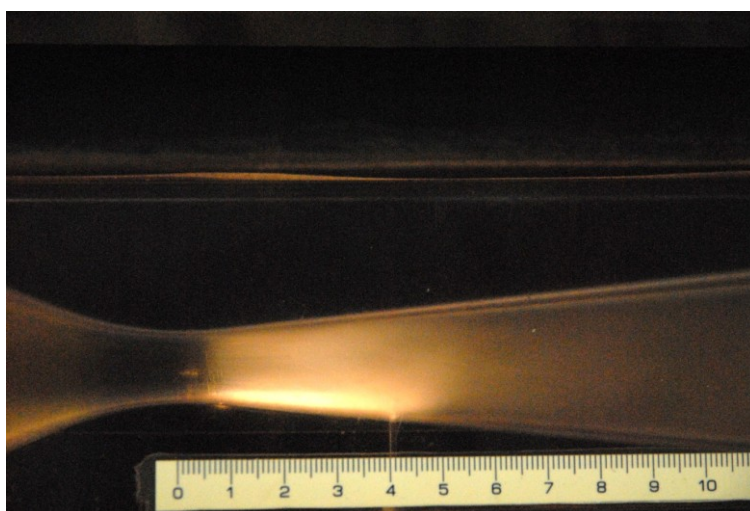
Obr. P 32 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($2,21 \text{ mg/dm}^3$)



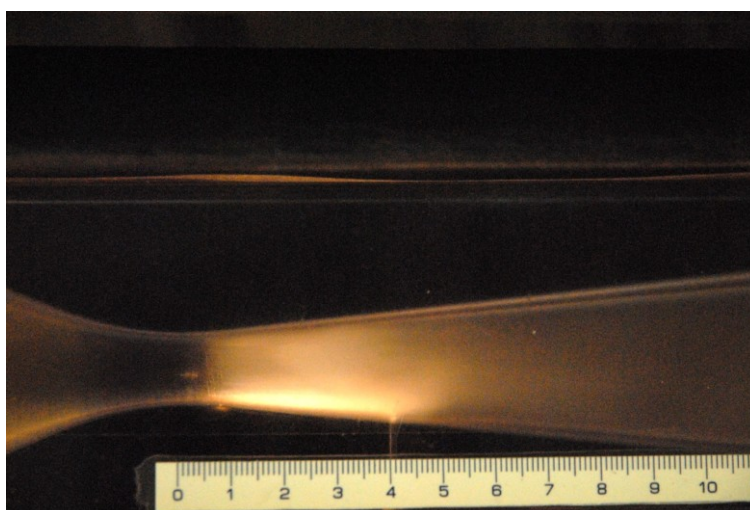
Obr. P 33 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($1,77 \text{ mg/dm}^3$)



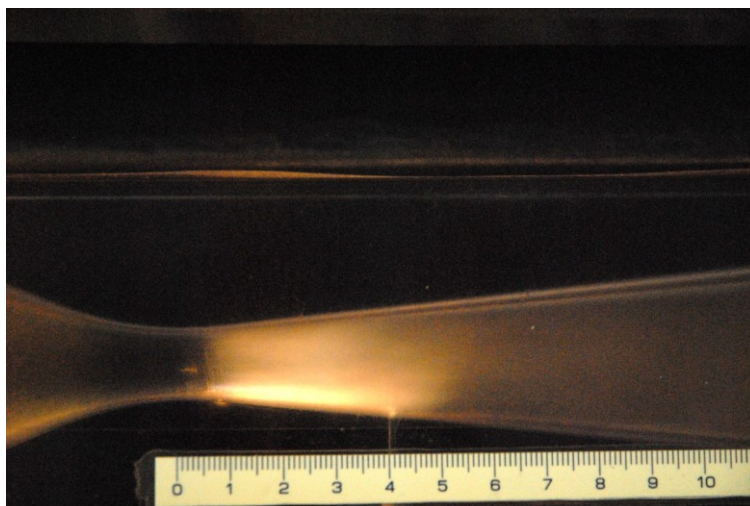
Obr. P 34 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($1,43 \text{ mg/dm}^3$)



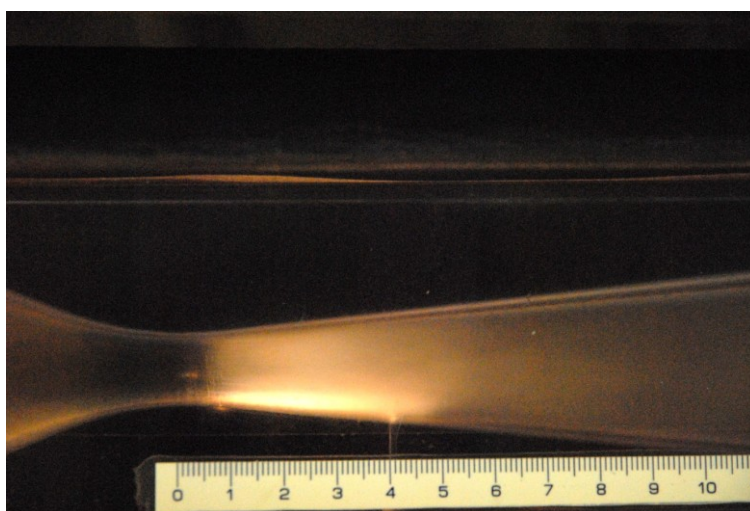
Obr. P 35 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($1,08 \text{ mg/dm}^3$)



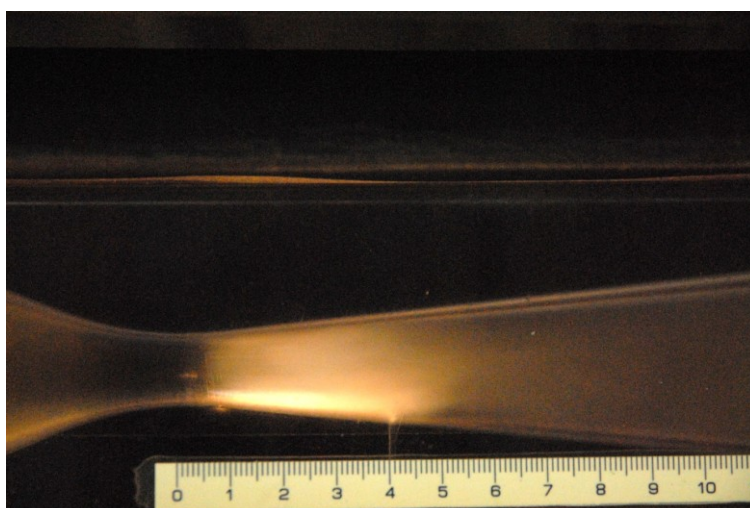
Obr. P 36 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,80 \text{ mg/dm}^3$)



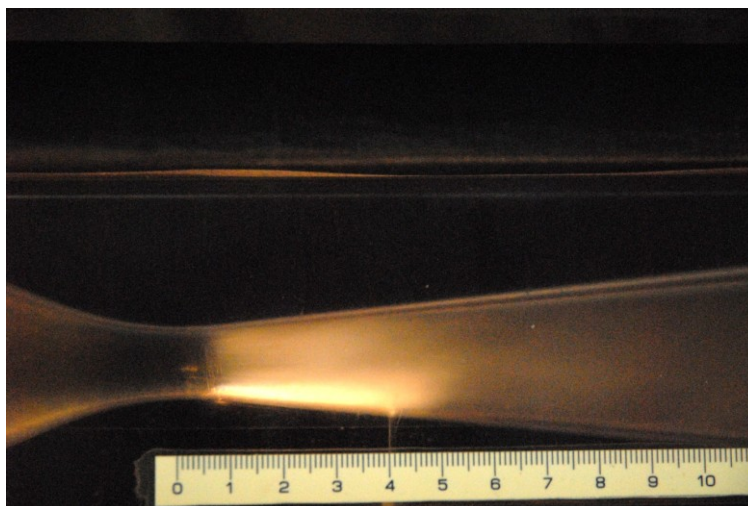
Obr. P 37 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,64 \text{ mg/dm}^3$)



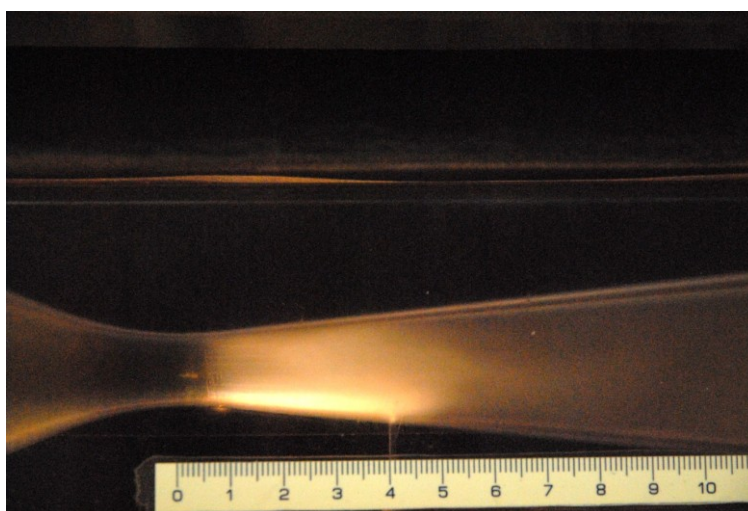
Obr. P 38 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,42 \text{ mg/dm}^3$)



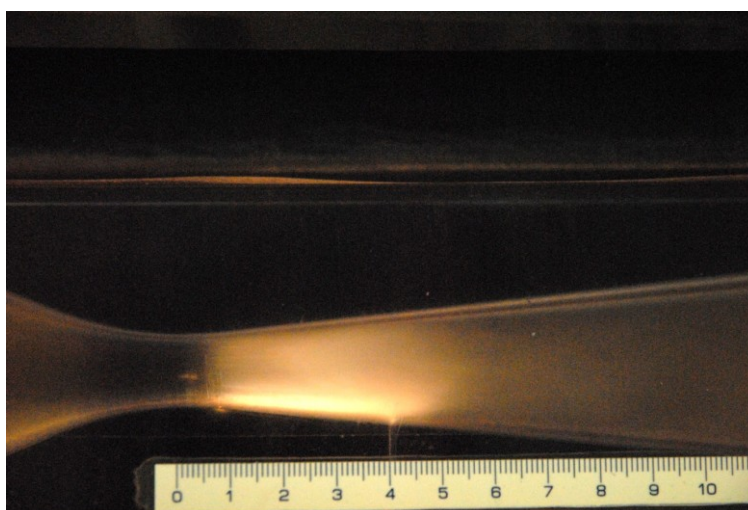
Obr. P 39 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,25 \text{ mg/dm}^3$)



Obr. P 40 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,18 \text{ mg/dm}^3$)



Obr. P 41 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,16 \text{ mg/dm}^3$)



Obr. P 42 Velikost kavitační oblasti podle obsahu kyslíku ($0,00 \text{ mg/dm}^3$)